

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
(Agrikulturchemisches Institut)
der Justus Liebig - Universität Gießen
Direktor: Professor Dr. habil. Hans Linser

DER EINFLUSS DER BODENDURCHFEUCHTUNG AUF DIE
KALIUM - VERFÜGBARKEIT SOWIE KALIUM - AUFNAHME
UND ERTRAGSBILDUNG DER PFLANZE

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades bei
der Landwirtschaftlichen Fakultät der
Justus Liebig - Universität zu Gießen

vorgelegt von

Leo-Christian v. Braunschweig
aus Hannover

Gießen, im März 1971



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus dem Institut für Pflanzenernährung
(Agrikulturchemisches Institut)
der Justus Liebig - Universität Gießen
Direktor: Professor Dr. habil. Hans Linser

DER EINFLUSS DER BODENDURCHFEUCHTUNG AUF DIE
KALIUM - VERFÜGBARKEIT SOWIE KALIUM - AUFNAHME
UND ERTRAGSBILDUNG DER PFLANZE

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades bei
der Landwirtschaftlichen Fakultät der
Justus Liebig - Universität zu Gießen

vorgelegt von

Leo-Christian v. Braunschweig
aus Hannover

Gießen, im März 1971



Dekan:	Professor Dr. Waßmuth
1. Berichterstatter:	Professor Dr. K. Mengel
2. Berichterstatter:	Professor Dr. E. v. Boguslawski

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Mai 1971

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I Einleitung	1
II Faktoren der Kalium-Verfügbarkeit	4
III Versuchstechnik	17
1. Versuchsanordnung	17
2. Versuchsdurchführung	24
3. Analytik	29
IV Ergebnisse	31
1. Die Ertragsbildung sowie Kalium-Aufnahme und Kaliumgehalt der oberirdischen Pflanz- masse	31
2. Ertragsbildung sowie Kalium-Aufnahme und Kaliumgehalt der Wurzeln	46
3. Calcium-, Magnesium- und Natrium-Aufnahme und -Gehalte von:	54
A.Sproß	54
B.Wurzeln	56
4. Beziehungen zwischen den verschiedenen Kalium-Fractionen im Boden und dem Kalium- Entzug der Pflanzen	58
V Gefäßversuch	65
1. Versuchstechnik und Analytik	66
2. Ergebnisse: Beziehungen zwischen den Kalium-Fractionen im Boden und Ertrag bzw. Kalium-Entzug der Pflanzen	68
VI Diskussion	75
VII Zusammenfassung	93
VIII Literaturverzeichnis	97

I Einleitung

" Mit der Untersuchung unserer Kulturböden auf ihren Gehalt an bestimmten Nährstoffen soll festgestellt werden, wie weit ein Boden in der Lage ist, eine Pflanze mit dem betreffenden Nährstoff zu versorgen " (SCHROEDER et al.1961). Die Analysenergebnisse sollen eine Aussage darüber geben, ob und in welcher Höhe eine Düngung mit diesem Nährstoff notwendig ist und zu einem Mehrertrag führen kann. Von dem Ergebnis einer Bodenuntersuchung soll also die Vorhersage eines Düngereffektes abgeleitet werden.

Dies erfordert die genauere Kenntnis darüber, wie ein Nährstoff im Boden vorliegt, welchen Umsetzungsprozessen er unterworfen ist und in welcher Form er von der Pflanze aufgenommen wird. Kurz, die Bodenuntersuchung soll den pflanzenverfügbaren Anteil eines Nährstoffes im Boden erfassen.

Der Kaliumgehalt der Erdrinde beträgt ungefähr 3%; in der Ackerkrume liegt er bei 1,5 - 1,9% (SCHEFFER et al.1960). Hiervon entfallen etwa 40% des Gesamtkaliums als Baustein von Feldspäten auf die Feinsandfraktion, 25% als Bestandteil von Glimmern auf den Schluff und 28% auf die Tonfraktion. Das Kalium in der Tonfraktion befindet sich zum weitaus größten Teil in den Zwischenschichten illitischer Tonminerale. Nur ca. 1 - 2% des Gesamt-K sind in austauschbarer Form im Boden gebunden. Das Kalium in der Bodenlösung, der wässrigen Phase des Bodens, stellt nur etwa 1 - 2% des austauschbaren K bei unseren Mineralböden dar (WIKLANDER 1954). Die K-Konzentration in der Bodenlösung kann sehr stark schwanken und zwischen 0,2 und 10 mmol liegen (MENDEL et al.1969). Für die K-Versorgung der Pflanze interessant ist primär das K in der Bodenlösung, das austauschbare K, das K in den Zwischenschichten der Tonminerale sowie das durch Verwitterung primärer Tonminerale freigesetzte Kalium. Das durch Düngung zugegebene K bleibt nur zum geringen Teil in der Bodenlösung, der größte Anteil geht in die austauschbare Form über oder wird in den Zwischenschichten der Tonminerale fixiert.

Für die Feststellung der K-Versorgung der Böden wird in Deutschland heute die Doppellaktatmethode nach EGNER u. RIEHM (1960) verwendet. Mit dieser Methode, der auch in etwa der Aufschluß mit 1 N NH_4 -Acetat entspricht, wird im Boden der größte Teil des austauschbaren K und des wasserlöslichen K in einem Wert erfaßt. Die extrahierte Menge wird als das "pflanzenverfügbare K" bezeichnet, indem davon ausgegangen wird, daß auch die Pflanzenwurzel in der Lage ist, diese chemisch austauschbaren K-Mengen mit Hilfe des Kontaktaustausches aufzunehmen. Wie aber mehrere Autoren zeigen, läßt sich aus diesen Werten zwar ungefähr der Versorgungsgrad an austauschbarem K im Boden ermitteln, aber eine Wirkung der beabsichtigten K-Düngung voraussagen, stößt auf Schwierigkeiten (KÖHNLEIN u. KNAUER 1959, SCHACHTSCHABEL 1963, BUCHER 1964, WITTER 1967, RATHSACK u. JUNGK 1968). Die Abb. (1) nach SCHWERDT u. JESSEN (1961) gibt den Verlauf der Mehrertragskurve von drei verschiedenen K-Düngungsstufen bei Böden mit unterschiedlichem Gehalt an Laktat-K wieder und veranschaulicht die starken Ertragsschwankungen.

Die Abb. zeigt ganz deutlich, daß aufgrund der K-Laktatzahl des Bodens keine genaue Ertragsvorhersage gemacht werden kann.

Die Laktatzahl gibt die zur Zeit der Probenahme austauschbaren K-Mengen im Boden an, läßt aber Tongehalt und K-Sättigung außer acht. Damit wird auch das K-Nachlieferungsvermögen nicht berücksichtigt. Ein Boden mit hohem Tongehalt und mäßiger K-Sättigung wird in etwa dieselbe Menge an austauschbarem K besitzen wie ein Boden mit geringem Tongehalt und hoher K-Sättigung. Der leichte Boden mit anfänglich hoher Laktatzahl kann aber sehr schnell an K erschöpft sein, während ein Tonboden mit niedriger Laktatzahl ein stetiges Nachlieferungsvermögen aus dem Zwischenschichtraum der Tonminerale über die gesamte Vegetationszeit hinweg besitzt.

Dieser unbefriedigende Zustand der schlechten Beziehung des Laktat-K zum verfügbaren K und der K-Düngewirkung auf den zu erwartenden Ertrag erfordert eine nähere Analyse der Nährstoffanlieferung.

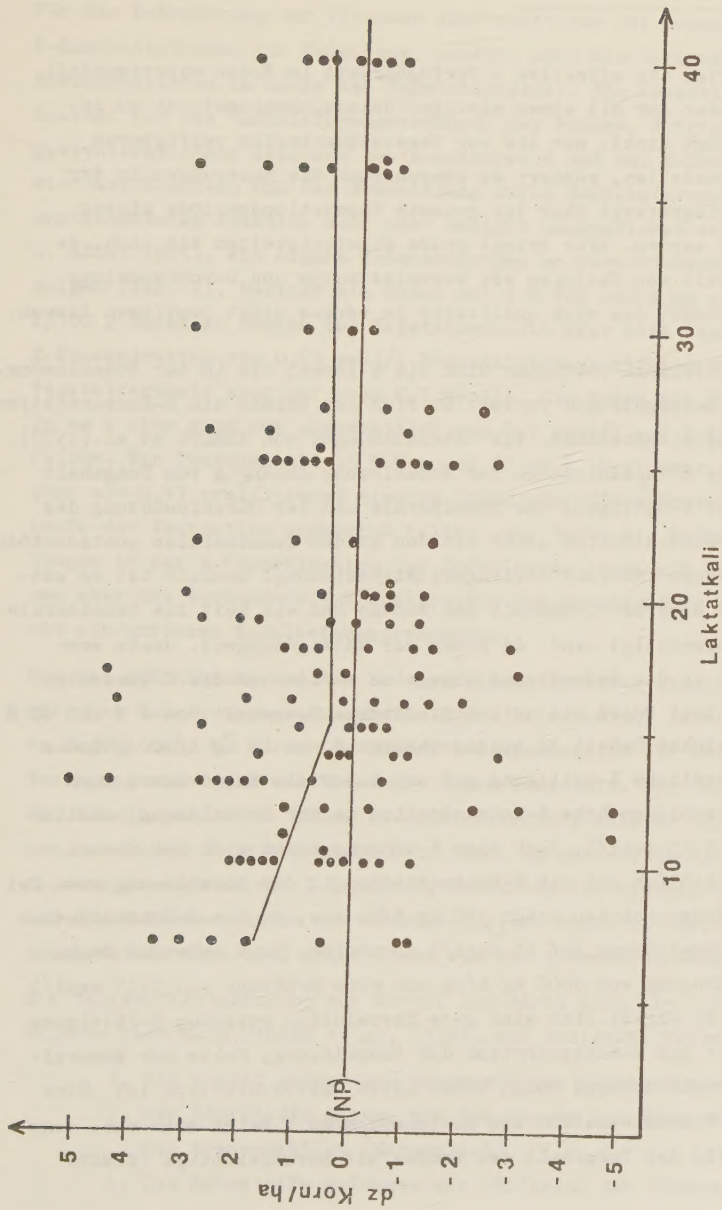


Abb. 1: Mittlere Ertragsabweichungen der Kali-Steigerungsabgaben gegenüber der Grunddüngung (NP)
(nach Schwerdt und Jessen 1961)

II Faktoren der K-Verfügbarkeit

Es ist schwierig, die effektive K-Verfügbarkeit im Boden experimentell zu bestimmen oder gar mit einer einzigen Untersuchungsmethode zu erfassen. Es genügt nicht, nur die vor Vegetationsbeginn verfügbaren K-Mengen festzustellen, sondern es müssen auch die Änderungen in der effektiven Verfügbarkeit über die gesamte Vegetationsperiode hinweg berücksichtigt werden. Dies bringt große Schwierigkeiten mit sich, da die Verfügbarkeit von Faktoren wie Wurzelwachstum und Durchfeuchtung des Bodens abhängt, die sich qualitativ im voraus nicht bestimmen lassen.

Direkt für die Pflanze verfügbar sind die K-Ionen, die in der Bodenlösung an die Wurzel herangetragen werden. Hierfür ist primär die K-Konzentration der Bodenlösung entscheidend. Wie Untersuchungen von NEMETH et al. (1970) zeigen, ist die K-Konzentration der Bodenlösung abhängig vom Tongehalt des Bodens, der K-Sättigung der Tonminerale und der Durchfeuchtung des Bodens. Die K-Konzentration steht mit den an den Tonmineralen austauschbar gebundenen K-Ionen in einer Gleichgewichtsbeziehung. Deshalb ist es entscheidend, wie hoch der Tongehalt des Bodens und wie weit die Tonminerale mit K-Ionen abgesättigt sind. Je höher der Sättigungsgrad, desto mehr können K-Ionen an die Bodenlösung abgegeben werden und die K-Konzentration erhöhen. Zwei Böden mit unterschiedlichem Tongehalt von 2 % und 40 % weisen bei gleichem Gehalt an austauschbarem K von 15 mg K/100 g Boden eine unterschiedliche K-Sättigung auf und haben als Folge davon auch eine recht verschieden hohe K-Konzentration in der Bodenlösung, nämlich 4 mval/l bzw. 0,15 mval/l. Auch eine K-Düngung wirkt sich bei diesen Böden unterschiedlich auf die K-Konzentration in der Bodenlösung aus. Bei dem leichten Boden reichen schon 500 kg K/ha aus, um die K-Konzentration von 4 mval/l Bodenlösung auf 15 mval/l anzuheben, beim schweren Boden bewirkt eine Düngung von 3000 kg K/ha nur eine Erhöhung von 0,15 mval/l auf 1 mval/l. Es ergibt sich eine gute Korrelation zwischen K-Sättigung der Tonminerale und K-Konzentration der Bodenlösung, falls der Mineralbestand der vergleichbaren Böden nicht allzu unterschiedlich ist. Eine Beziehung der K-Konzentration zum austauschbaren K zeigt sich nur, wenn man gleichzeitig den Tongehalt des Bodens mit berücksichtigt (NEMETH et al. 1970).

Für die K-Ernährung der Pflanzen sind nicht nur die augenblicklichen K-Konzentrationen von Bedeutung, sondern auch die Veränderungen der Konzentrationen im Laufe der Vegetationszeit. Ein wesentlicher Faktor hierbei ist das Nachlieferungsvermögen des Bodens. Aufgrund der Gleichgewichtsbeziehung zwischen austauschbarem K und der K-Konzentration wird der K-Entzug aus der Bodenlösung durch Nachlieferung aus der austauschbaren Fraktion mehr oder weniger ausgeglichen werden (MENGEL u. AKSOY 1971). Wie eigene Untersuchungen an verschiedenen Bodenarten zeigen (Abb. 2), besitzt ein Boden mit 1 % Ton und 4 mg austauschbarem K/100 g Boden zu Beginn der Vegetationszeit zwar eine recht beachtliche K-Konzentration von 0,65 mval/l Bodensättigungsextrakt, am Ende der Vegetationszeit aber nur noch 0,1 mval/l. Ein Boden mit 25 % Ton und 26 mg K aber wird nur unwesentlich von 0,5 mval/l auf 0,35 mval/l abfallen. Ein Tonboden mit 33 % Ton und 20 mg K liegt zwar schon zu Beginn mit 0,17 mval/l recht niedrig, kann aber diese Konzentration im Laufe der Vegetation annähernd halten. Die Böden mit hohem Tongehalt liegen in der K-Konzentration der Bodenlösung insgesamt niedriger, können aber die vorhandene K-Konzentration besser abpuffern und haben damit ein größeres Nachlieferungsvermögen.

Für die K-Ernährung und die Ertragsbildung bedeutet dies, daß bei gleichem Gehalt an austauschbarem K den Pflanzen auf leichten Böden zu Beginn mehr K^+ durch die höhere K-Konzentration der Bodenlösung zur Verfügung steht als auf Böden mit hohem Tongehalt. Bei den schweren Böden fließt jedoch die K-Quelle kontinuierlich, während bei leichten Böden der Vorrat bald erschöpft sein kann. Um gesicherte Erträge zu erreichen, soweit es die K-Ernährung betrifft, ist deshalb zu fordern, daß die K-Konzentration der Bodenlösung bei Böden mit geringerem Tongehalt stets sehr viel höher liegt als bei schwereren Böden.

Die Nährstoffanlieferung zur Wurzel und damit auch die K-Versorgung der Pflanze kann nach BARBER et al. (1963) auf dreierlei Weise erfolgen:

1. Die Wurzel wächst zum Nährstoff hin (Interzeption)
2. Die Nährstoffe werden mit dem Wasser zur Pflanzenwurzel hin transportiert (Massenfluß)
3. Die Nährstoffe gelangen per Diffusion zur Pflanzenwurzel

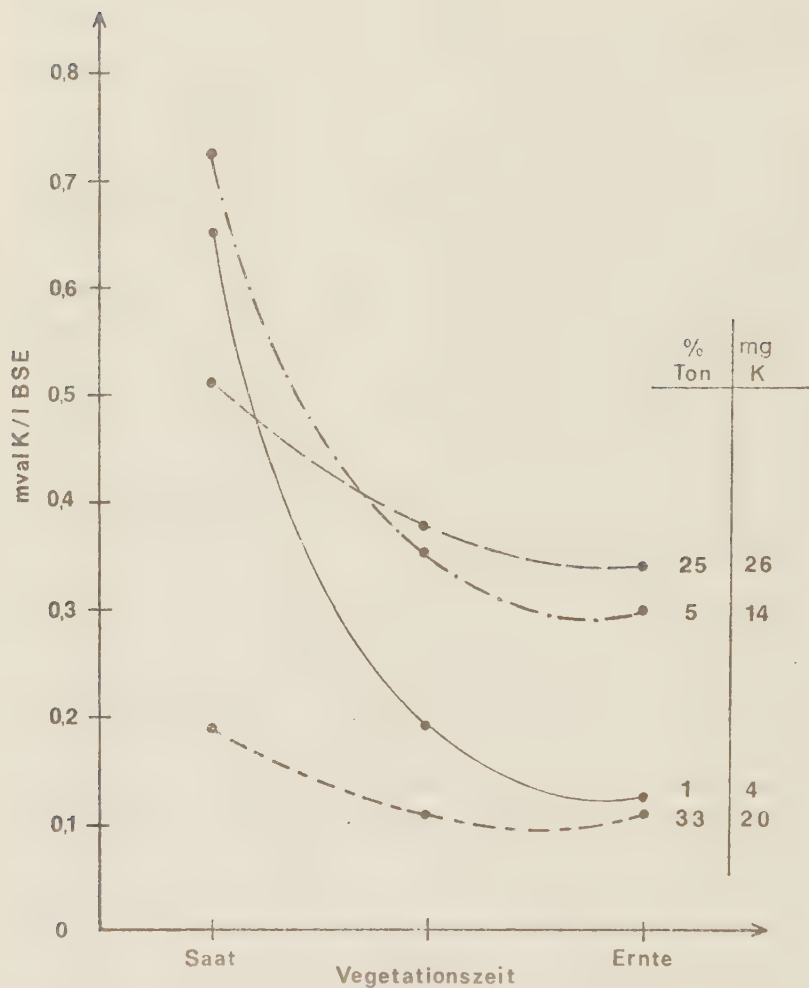


Abb. 2: Abfall der K-Konzentration im Laufe der Vegetationszeit bei Böden mit unterschiedlichem Ton- und K-Gehalt (austauschbares K mg K/100 g Boden)

Bei der Interzeption wächst die Pflanzenwurzel zum Nährstoff hin, d.h. zu den K-Ionen, die in austauschbarer Form an die Tonminerale gebunden sind und nimmt diese mit Hilfe des " Kontaktaustausches " auf. Diese Theorie der Nährstoffaufnahme, wie sie JENNY u. OHLERS (1938) aufgestellt haben, nimmt an, daß sich die Oszillationsräume der sorbierten Ionen eines Tonkolloids mit denen der Wurzeloberfläche überlappen und so ein direkter Umtausch von z.B. K^+ und H^+ erfolgen kann (MENDEL 1972). Wie aber MENDEL et al. (1969) zeigen, müssen auch die Ionen, die an den Oberflächen der Bodenkolloide gebunden sind, die Bodenlösung passieren, um in den " free space " der Wurzeloberfläche zu gelangen. Ein im strengen Sinne definierter " Kontaktaustausch " ist demnach nicht gegeben.

Verschiedene Modelluntersuchungen von SANDER et al. (1963), BLANCHET (1965) und DREW u. NYE (1969) ergeben, daß der Anteil der K-Ionen, den die Pflanze mittels Interzeption aufnimmt, recht gering ist und den Faktoren Massenfluß und Diffusion wesentlich größere Bedeutung zukommt. Nach Werten von DITTMER (1940) und GLIEMEROM (1952) über Wurzellänge und Wurzel Durchmesser läßt sich eine durchschnittliche Wurzeloberfläche von 20 ha bei einem Getreidebestand auf 1 ha Ackerkrume annehmen. Unter Berücksichtigung der Wurzelhaare erhöht sich die Wurzeloberfläche um den Faktor 10 auf ca. 200 ha/1 ha Boden (DREW u. NYE 1969 und DITTMER 1940). Bei einem Boden mit 20% Ton und 5% K-Absättigung ergeben sich bei einer Ladungsdichte des Tons von $3 \cdot 10^{-7}$ mval/cm² eine Menge von 3/10 mval K/ha Bodenoberfläche.

Berechnung der K-Menge, die mit Hilfe des Kontaktaus-
tausches (Interzeption) von der Pflanze aufgenommen
wird

$$\begin{aligned}
 \text{Ladungsdichte des Tons} &= 3 \cdot 10^{-7} \text{ mval/cm}^2 \\
 &= 3 \cdot 10^{-7} \cdot 10^4 \cdot 10^4 \text{ mval/ha} \\
 &= 3 \cdot 10 \text{ mval/ha} \\
 \text{bei 20\% Ton} &= \frac{20}{100} \cdot 3 \cdot 10 \text{ mval/ha} \\
 &= 6 \text{ mval/ha} \\
 \text{bei 5\% K-Absättigung des Tons} &= \frac{5}{100} \cdot 6 \text{ mval/ha}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{bei 200 ha Wurzeloberfläche, die mit dem Ton in Kontaktaustausch stehen} &= \frac{200 \times 5 \times 6}{100} = 60 \text{ mval K/ha} \\
 &= 2,4 \text{ g K}
 \end{aligned}$$

Wenn 200 ha Wurzeloberfläche mit den Bodenkolloiden in Kontaktaus-
tausch treten, kann der Getreidebestand von 1 ha 60 mval K oder
2,4 g K durch Interzeption dem Boden entziehen. Dies sind bei einem
Bedarf von 100 - 140 kg/ha bei Getreide (OEHM 1967) nur 0,015% des
Gesamtbedarfs, sie sind deshalb praktisch ohne Bedeutung. Der K -
Transport zur Pflanzenwurzel ist also das wesentliche Kriterium der
K-Verfügbarkeit und geschieht mittels Massenfluß und Diffusion in
der wässrigen Phase des Bodens.

Die mit dem Massenfluß zur Wurzel getragenen Kaliummengen ergeben
sich aus der Wassermenge, die während der Vegetationszeit zur Wurzel
strömt und aus der K-Konzentration dieses Wasserstroms. Da die K-Kon-
zentration unter Feldbedingungen sehr stark schwankt, kann sie nur in
Annäherung erfaßt werden. Setzt man den Wasserstrom, der zur Wurzel-
oberfläche gelangt, gleich mit dem in einer Vegetationsperiode trans-
pirierten Wasser von ca. $3 \cdot 10^6$ l/ha Getreide, so ergibt sich bei
einer durchschnittlichen K-Konzentration von 0,5 mval K/l Boden -
sättigungsextrakt eine K-Menge von 60 kg K/ha, die mit dem Massenfluß
zur Wurzeloberfläche transportiert wird (MENDEL et al. 1969). Diese
Ergebnisse stimmen mit den Werten überein, die BLANCHET (1965) und
OEHM (1967) gefunden haben.

Dieser verhältnismäßig hohe Anteil des Massenflusses an der K-Ernährung
basiert auf der Voraussetzung, daß der K-Bedarf und die K-Aufnahme
der Pflanze über die gesamte Vegetationszeit hinweg mit den Zeiten
hoher Transpirationsraten zusammenfallen. Dies trifft jedoch nicht
zu; die Pflanze nimmt einen großen Teil der Kaliumionen bereits im
Frühstadium des Wachstums auf (MENDEL u. FORSTER 1971), die hohen Trans-
pirationsraten der Pflanze liegen zeitlich jedoch viel später.

Auch die Diffusion von K-Ionen im Boden, die als Hauptkomponente der
K-Anlieferung angesehen wird (MENDEL et al. 1969, OLIVER et BARBER
1966, BARBER et al. 1963), zeigt eine enge Beziehung zur K-Konzentra-
tion der Bodenlösung sowie zum Feuchtigkeitsgehalt des Bodens (GRIMME
et al. 1971). Eine Diffusion von K-Ionen im Boden zur Pflanzenwurzel
hin tritt immer dann auf, wenn die Bodenlösung an der Wurzeloberfläche
an K-Ionen verarmt und damit ein Konzentrationsgefälle entsteht.

Die größte K-Diffusion wird immer zu den Zeiten des höchsten K - Bedarfs der Pflanzen auftreten, wenn alle anderen Diffusionsbedingungen ausreichend sind. OLIVER u. BARBER (1966) fanden bei Untersuchungen an Sojabohnen, daß bei der K-Ernährung die Interzeption mit 1,7 bis 3,8%, der Massenfluß mit 2,3 bis 9,2% und die Diffusion mit 87 bis 96% beteiligt sind.

Beide Vorgänge der K-Anlieferung, der Massenfluß und die Diffusion, finden in der wässrigen Phase des Bodens statt und sind deshalb stark von der Durchfeuchtung des Bodens abhängig. Hoher Wassergehalt im Boden und gute Wasserbewegung wirken sich positiv auf den Massenfluß aus. Auch die Diffusion wird sich bei guter Durchfeuchtung des Bodens erhöhen, weil dann mehr Poren mit Wasser gefüllt sind und die diffundierenden Ionen kürzere Wasserwege vorfinden. Bei schlecht durchfeuchtetem Boden müssen die Ionen an den Wasserfilmen der Bodenteilchen entlang diffundieren und haben somit einen weit längeren Weg zurück zulegen (GRILLE et al. 1971).

Eine deutliche Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt des Bodens zeigt die K-Konzentration der Bodenlösung. Bei gleicher Menge an K-Ionen in der Lösung und abnehmendem Wassergehalt wird die Konzentration ansteigen. MOSS (1964) fand ein Ansteigen der K - Konzentration in der Bodenlösung mit steigendem pF-Wert und damit abnehmendem Wassergehalt von 0,7 mmol/l bei pF 0 auf 1,3 mmol/l bei pF 2,8.

Das austauschbare K wird nach Untersuchungen verschiedener Autoren vom Feuchtigkeitsgehalt des Bodens nicht beeinflusst (BARBER 1960, BARBER u. BURNS 1961, AHMAD u. DAVIS 1970). BATES u. SCOTT (1969) haben die Veränderung an austauschbarem K untersucht, wenn Bodenproben getrocknet und wieder befeuchtet werden und finden, daß sich das Niveau an austauschbarem K beim Trocknen erhöht, beim Wiederbefeuchten aber das ursprünglich niedrigere Niveau der ungetrockneten Böden nicht ganz wieder erreicht wird. Das würde bedeuten, daß durch Austrocknen der Böden mehr K in den austauschbaren Zustand übergeht. RAJKOVIC (1968) untersuchte verschiedene Bodentypen auf K-Freisetzung in Abhängigkeit von Feuchte und Trockenheit in

Gefäßen ohne Vegetation. Bei Schwarzerde und Pseudogley fand er keinen Einfluß, bei einem braunen Waldboden eine geringe Freisetzung von 2 mg $K_2O/100$ g Boden. Nur bei einem Smonitz-Boden wurde das austauschbare K um 13 mg $K_2O/100$ g Boden beim Austrocknen und Wiederbefeuchten erhöht.

Wie gezeigt wurde, hat der direkte Kontaktaustausch zwischen Bodenkolloid und Pflanzenwurzel nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamt-K-Ernährung. Wenn auch RAJKOVIC bei einigen Böden einen Einfluß der Änderung der Durchfeuchtung auf die Höhe an austauschbarem K gefunden hat, so spielt dies für die direkte K-Aufnahme nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Eine Erhöhung an austauschbarem K könnte nur dadurch positiv auf die K-Ernährung einwirken, daß sich die K-Sättigung der Tonminerale erhöht und dadurch auch die K-Konzentration in der Bodenlösung erhöhen wird, da beide in einer Gleichgewichtsbeziehung zueinander stehen.

Die Durchfeuchtung des Bodens hat also auf die wesentlichen Faktoren der K-Verfügbarkeit, die K-Konzentration der Bodenlösung, die Diffusion und den Massenfluß erheblichen Einfluß.

Es gilt nun zu untersuchen, wieweit auch die K-Aufnahme und der Pflanzenertrag auf den Wassergehalt des Bodens reagieren. Eine ausreichende K-Aufnahme setzt eine hohe K-Verfügbarkeit voraus und kann deshalb gleichzeitig als Parameter der K-Verfügbarkeit gelten.

Eine Bedeutung der Bodendurchfeuchtung für die K-Ernährung der Pflanze ist schon von mehreren Autoren beschrieben worden. Van der PAAW (1958) hat auf leichter kaliarmer Seemarsch bei 15-jährigen Kalisteigerungsversuchen von 0 - 480 kg K_2O/ha den Einfluß meteorologischer Faktoren auf den Kartoffelertrag bei unterschiedlicher K-Düngung geprüft. Eine klare Beziehung ergibt sich zwischen Kartoffelertrag und der Anzahl regenfreier Tage in den Monaten Mai - Juli bei unterschiedlicher Kaliumdüngung (K_0 - ohne Kalidüngung, K_{480} = 480 kg K_2O/ha).

In sehr feuchten Jahren liegen die Erträge sowohl bei K_0 als auch

bei K_{480} besonders niedrig, bei K_{480} jedoch noch doppelt so hoch wie bei K_0 . In normal feuchten Jahren steigen die Erträge bei beiden K-Varianten stark an; das Ertragsverhältnis $K_{480}/K_0 = 2 : 1$ bleibt ungefähr erhalten. Steigt die Anzahl der regenfreien Tage in sehr trockenen Jahren an, so fällt die Ertragskurve von K_0 wieder stark ab, die Erträge bei K_{480} jedoch halten die Höhe wie in normal feuchten Jahren. In der hohen K-Düngungsstufe ist in trockenen Jahren kein Ertragsabfall gegenüber feuchten Jahren festzustellen. Der Ertragsunterschied zwischen K_0 und K_{480} ist also in trockenen Jahren am größten.

Van der PAAUW vermutet, daß der Anteil des verfügbaren Kaliums mit den Unterschieden der Bodenfeuchtigkeit zusammenhängt, denn mit Zunahme der regenfreien Tage nimmt der K-Gehalt der Knollen ab, die Pflanze kann nicht mehr so viel K aufnehmen. Zum gleichen Ergebnis kommt RUSSELL (1928). Auch er konnte bei Feldversuchen eine negative Korrelation zwischen regenfreien Tagen im Zeitraum Juli - Oktober und dem Ertrag von Kartoffeln bei mäßiger K-Versorgung feststellen. Die Wirkung der Anzahl regenfreier Tage war umso schwächer, je höher die verabreichten K-Düngergaben waren. Alle diese Beobachtungen, die auch FERRARI (1952) auf kaliarmen Flußmarschböden gemacht hat, lassen einen Einfluß der Bodendurchfeuchtung auf die K-Verfügbarkeit und K-Aufnahme vermuten. nach Meinung der Autoren ist weniger die absolute momentane Regenmenge entscheidend als die Regenverteilung während der Hauptvegetationszeit.

OEHM (1967) hat im nordhessischen Raum die Nährstoffentzüge und -gehalte im trockenen Jahr 1964 und im feuchten Jahr 1965 bei verschiedenen Fruchtarten untersucht. Er kommt zu dem Ergebnis, daß die K-Entzüge im nassen Jahr bei Hackfrüchten und den meisten Getreidearten höher liegen als im trockenen Jahr. Bei den Getreidearten führt er den Mehrentzug auf die höheren Erträge zurück, da der K-Gehalt dieser Pflanzen im nassen Jahr deutlich niedriger liegt. Bei den Hackfrüchten dagegen steigen im nassen Jahr sowohl K-Entzüge als auch K-Gehalte gegenüber dem trockenen Jahr an.

Auch BARBER (1960) findet verschiedene Reaktionen von Zea Mays auf die K-Düngung, die er auf unterschiedliche klimatische Faktoren von

Jahr zu Jahr zurückführt. Je geringer die Regenmenge in den Monaten Juni, Juli, August, desto weniger K wurde von den Pflanzen aufgenommen. Aber auch bei übermäßigem Regen nahm die K-Aufnahme der Pflanzen ab.

Es ist ein schwieriges Unterfangen, im Feldversuch festzustellen, welchen Einfluß die Bodenfeuchte auf die K-Verfügbarkeit nimmt, da die im Boden befindlichen Wassermengen sehr stark schwanken und auch andere Umweltfaktoren, wie z.B. Temperatur und N-Verfügbarkeit, auf das Wachstum einen Einfluß nehmen, ebenso wie auf Freisetzung + Auswaschung von K-Ionen (GARBOUCHEV 1966). Es wurde deshalb versucht, dieser Frage in Gefäßversuchen nachzugehen. Sie bieten den Vorteil, viele Nebeneinflüsse auf Pflanzen und Boden auszuschließen sowie den Wasserhaushalt zu kontrollieren. Unter solchen kontrollierten Verhältnissen haben BROWN, PLACE u. PETTET (1960) eine bedeutende Zunahme an aufgenommenem K festgestellt, wenn die Bodenfeuchtigkeit vom permanenten Welkepunkt bis zur Sättigung erhöht wird. Gleichzeitig finden sie aber eine Abnahme in der K-Aufnahme, wenn die Wasserspannung im Boden nur noch $0 - 1/3$ atm beträgt. Die Bodenfeuchtigkeit wurde durch laufende gravimetrische Überprüfung und daraus folgender Wasserzugabe kontrolliert. Zu dem Ergebnis einer guten Beziehung zwischen K-Aufnahme und Bodendurchfeuchtung kommen mehrere Autoren, wie DANIELSON u. RUSSELL (1957), WALLACE (1958), PETERS u. RUSSELL (1960), BLANCHET et al. (1962), JUNG u. CHAN (1966), SARIC (1966) u. Le ROUX et al. (1967). Sie alle haben ebenso wie BROWN et al. (1960) ihre Versuche in Gefäßen durchgeführt und den Wassergehalt gravimetrisch überprüft. Auch sie finden eine Verringerung des K-Entzuges mit Zunahme der Wasserspannung. MEDERSKI et al. (1960) haben eine besondere Technik angewandt, um den Wassergehalt im Boden konstant zu halten (hierauf wird später noch einzugehen sein). Sie untersuchten die K-Aufnahme von Zea Mays bei drei verschiedenen K-Düngungsstufen und verschiedenen Wassergehalten von 9 - 19 % in einem lehmigen Tonboden. Die Versuchsdauer betrug 3 Wochen. Leider sind keine pF-Werte für die verschiedenen Wassergehalte angegeben, vermutlich liegen diese aber bei pF 3,5 bei 9 % Wassergehalt und bei pF 2,5 bei 19 % Wassergehalt. Hierbei finden MEDERSKI et al. bei allen drei K-Düngungsstufen einen Anstieg in der K-Aufnahme mit Zunahme

des Wassergehaltes im Boden. Der Anstieg in der K-Aufnahme ist bei der höchsten K-Stufe im Boden relativ am größten. Bei einem weiteren Anstieg des Wassergehaltes auf 19% oder pF 2,5 geht die K-Aufnahme bei K_0 und K_1 nur leicht zurück, bei K_2 der höchsten K-Stufe allerdings fällt die Kurve wieder steil ab. Bemerkenswert hierbei ist, daß MEDERSKI bereits eine Verringerung der K-Aufnahme zwischen pF 2,8 und pF 2,5 findet in einem Bereich, in dem bei den anderen Autoren noch ein Anstieg der K-Aufnahme festzustellen ist.

Sieht man von den Versuchen ab, die MEDERSKI (1960) und auch JUNG u. CHAN (1966) sowie MOSS (1964) durchgeführt haben, so haben alle anderen Experimente den Nachteil, daß der Wassergehalt im Boden zwar laufend gravimetrisch überprüft wurde, dieser jedoch in den Zwischenzeiten mehr oder weniger großen Schwankungen unterworfen war. Dadurch wird das Nährmedium der Pflanze laufend verändert. Dies betrifft nicht nur das unterschiedliche Wasserangebot für die Pflanze, sondern auch das Angebot an anderen Pflanzennährstoffen.

HESLEP et al. (1954) und auch OLSEN u. WATANABE (1963) finden eine starke Abhängigkeit der P-Diffusion zur Pflanzenwurzel hin vom Wassergehalt des Bodens. Auch die N-Verfügbarkeit im Boden steigt mit zunehmendem Wassergehalt, da die N-Mineralisierung mit zunehmendem Wassergehalt zunimmt (PATRICK u. WYATT 1964). Was für die beiden Hauptnährstoffe N und P gilt, ist auch für die meisten Spurenelemente von Bedeutung (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL 1970). So kann bei dieser Versuchsanordnung keine klare Aussage gemacht werden, ob ein Ertragsabfall und auch eine verminderte K-Aufnahme bei abnehmendem Wassergehalt im Boden eine Folge der verminderten K-Verfügbarkeit ist, oder aber durch direkten Wassermangel und schwankendes bzw. vermindertes Angebot anderer Nährstoffe verursacht wird.

MOSS (1964) findet unter definierten Bodenfeuchtebedingungen zwischen pF 0 und pF 3 zunächst einen Anstieg im Ertrag zwischen pF 0 und pF 2, anschließend aber einen starken Ertragsabfall zwischen pF 2 und pF 3. Die Kurve verläuft genau so wie die K-Aufnahme-Kurven von BROWN et al. (1960). Es läßt sich aber nicht eindeutig sagen, ob die verminderte K-Aufnahme zwischen pF 2 und pF 3 eine Folge der verringerten K -

Verfügbarkeit im Boden ist oder nur durch die zurückgehende Ertragsproduktion verursacht wird. Es kann daher keine klare Aussage darüber gemacht werden, ob der eine Faktor Ursache und der andere die Folge ist oder umgekehrt.

Um den Faktor "Wassermangel" auszuschalten, benutzen MEDERSKI et al. (1960, und auch PLACE u. BARBER (1964) eine besondere Technik. Der Boden mit der gewünschten Feuchtigkeit wurde mit einer Wachsschicht umhüllt und in die untere Hälfte des Versuchsgefäßes deponiert. Darüber befindet sich, vom Boden durch die Wachsschicht getrennt, eine Nährlösung. Die Pflanzenwurzeln müssen zunächst die Nährlösung durchwachsen, ehe sie die Wachsschicht durchstoßen können und in den Boden gelangen. Aus der Nährlösung erhalten die Pflanzen alle Nährstoffe einschl. ausreichend Wasser mit Ausnahme des zu untersuchenden, den sich die Wurzeln aus dem Boden aneignen müssen. Mit dieser Technik kann die K-Aufnahme in Abhängigkeit von der Wasserspannung des Bodens von den anderen Wachstumsfaktoren abgegrenzt werden. Diese Technik hat neben anderen noch zu behandelnden den Nachteil, daß alle Pflanzen zunächst bei ihrem ausschließlichen Wachstum in der Nährlösung an K-Mangel leiden, welcher die endgültige Auswertung des Versuchs verfälscht. Auch JUNG u. CHAN (1966) schlagen ein "split-root" - Verfahren vor, dessen Technik leider nicht näher beschrieben wurde.

MOSS (1964) lehnt eine Anwendung der "split-root" - Technik aus zwei Gründen ab:

- a) glaubt er, daß ein normales Wachstum im Versuchsgefäß die Verhältnisse auf dem Feld besser wiedergibt,
- b) können seiner Meinung nach Einwirkungen des übermäßigen Wasserangebotes aus der Nährlösung auf die Ionenaufnahme auftreten.

Soll die K-Aufnahme der Pflanze als Maßstab für die K-Verfügbarkeit im Boden verwendet werden, so muß darauf geachtet werden, daß die Pflanzen im guten Zustand, d.h. optimal mit Nährstoffen und Wasser versorgt sind. In den Versuchsgliedern, in denen mit guter Durchfeuchtung gearbeitet wird, kann die Pflanze auch genügend Wasser aufnehmen, und wenn die anderen Nährstoffe ausreichend hinzugegeben wurden, auch gut ernährt werden.

In trockeneren Versuchsvarianten jedoch kann die Wasserversorgung zum begrenzenden Faktor für das Pflanzenwachstum werden. Eine schlecht mit Wasser versorgte Pflanze jedoch wird schlechter wachsen und dadurch auch weniger Nährstoffe aufnehmen, auch wenn diese verfügbar sein sollten. Man kann auch nicht die K-Aufnahme gut mit Wasser versorfter und schlecht mit Wasser versorgter Pflanzen vergleichen. Bei den meisten Autoren bleibt dieser Zusammenhang unberücksichtigt, und nur bei Anwendung der "split-root" - Technik dürfte es möglich sein, die einzelnen Faktoren, welche den K-Einsatz beeinflussen, klar abzugrenzen. Bei dieser Technik wird von dem einen Teil der Wurzeln die Pflanze ausreichend mit Wasser und anderen Nährstoffen versorgt, den anderen Wurzelteil kann man unter definierten Bedingungen im Boden wachsen lassen. Diese Technik kann aber nur für Nährionen angewendet werden, die selbst in der Pflanze leicht beweglich sind und somit schnell in alle Pflanzenteile wandern einschl. den Wurzelteilen, die in dem Medium ohne diesen Nährstoff wachsen müssen. Für den Nährstoff K kann die "split-root" - Technik angewendet werden, nicht aber z.B. für Ca, welches nur in akropetaler Richtung wandern kann.

Die meisten Autoren haben ihre Versuche so durchgeführt, daß sie die Bodenfeuchtigkeit immer wieder durch regelmäßiges Wiegen eingestellt haben. Diese Methode kann für exakte Messungen nicht ausreichen, da die Schwankungen im Wassergehalt zwischen den Wägungen recht unterschiedlich sind und gerade in den trockenen Varianten so weit führen können, daß das Wachstum und hiermit die Kaliumaufnahme gestört sind. Wie die Versuche von MEDERSKI zeigen, kann eine Änderung von 2% Wassergehalt schon eine Veränderung in der K-Aufnahme von 30% hervorrufen. Auch lassen sich bei der Wasserzugabe beim Wiegen des Gefäßes Unterschiede in der Bodendurchfeuchtung nicht vermeiden, je nachdem ob das Wasser auf die Bodenoberfläche oder auf den Gefäßgrund gegeben wird. Wird das Wasser von unten dem Versuchsgefäß zugeführt, so besteht die Möglichkeit, daß auch in trockenen Varianten die Wurzeln am Gefäßgrund - und hier befinden sich die meisten Wurzeln - genügend Wasser haben, der übrige Boden aber völlig ausgetrocknet ist. MEDERSKI et al. (1960) schlagen deshalb folgende Methode vor, um diese Schwankungen auszuschalten: Sie geben zu einer gewissen Bodenmenge die gewünschte Wassermenge hinzu, durchmischen den Boden gut und umgeben anschließend diesen Boden mit einer Wachsschicht. Die Pflanzewurzeln müssen dann diese

Schicht durchstoßen, um in den Boden zu gelangen. Über diesem Bodenblock befindet sich eine Nährlösung, in der die Pflanzen angezogen werden. Auf diese Weise wird verhindert, daß der Boden durch Evaporation Feuchtigkeit verliert und die Pflanze dem Boden nicht viel Wasser entzieht, da sie ja genügend aus der Nährlösung erhält. Aber auch hierbei können gewisse Änderungen des Wassergehaltes nicht verhindert werden. Da sie ja während der Vegetationszeit kein Wasser mehr hinzugeben, nimmt die Bodendurchfeuchtung in dieser Zeit ab. Dementsprechend wurden im Bodenblock Feuchtigkeitsverluste von 10 - 30 % gemessen.

Nicht berücksichtigt bleibt auch, daß in diesem Bodenblock keinerlei Gasaustausch vonstatten gehen kann. Es liegen zwar keine Messungen vor, aber es ist anzunehmen, daß der Sauerstoff sehr bald zum begrenzenden Faktor wurde und sich dafür CO_2 anreicherte. Unter diesen Bedingungen kann der Gasaustausch der Wurzeln nicht mehr optimal sein und damit auch der Stoffwechsel der Wurzeln gehemmt werden. WIERSUM (1959), HARRIS u. BAVEL (1957), WILLIAMSON (1962), LUNEGARTH (1957). Ebenso ist die Mikroorganismen-tätigkeit gehemmt. Diese können ihre organischen Nährstoffe nicht bis zum H_2O und CO_2 abbauen und produzieren mehrere für die Pflanzenwurzel toxisch wirkende Stoffe, wie Äthylen, H_2S , Zyanid und Buttersäure (MENDEL 1972). MOSS (1964) schloß vor, den Boden mit einer gewissen, wassergesättigten Tonplatte zu bewässern, die sich am Grunde des Versuchsgefäßes befindet. Die Tonplatte steht mit einem Wassergefäß in Verbindung, in welchem das Wasser mit einem gewissen Unterdruck der Tonplatte angeboten wird. Der Boden wird dann mittels seiner ihm eigenen Saugspannung das Wasser der Tonplatte entziehen. Wenn bei dem von MOSS beschriebenen Modell auch die Schwankungen ausgeschaltet sind, so kann er jedoch nicht verhindern, daß sein Modell einen gewissen Feuchtigkeitsgradienten zur Oberfläche hin besitzt, da die Tonplatte sich am Fuße des Versuchsgefäßes befindet. Das hat auch den Nachteil, daß sich die meisten Pflanzenwurzeln, die immer das Bestreben haben nach unten zu wachsen, nicht auf der Tonplatte befinden werden, da sie hier gerade in den trockeneren Varianten mehr Wasser bekommen können. Da MOSS die "split-root" - Technik ablehnt, hat er wieder die gleichen störenden Faktoren im Versuch wie oben schon beschrieben.

III Versuchstechnik

- - - - -

Mit den folgenden Experimenten soll nun versucht werden, zu klären, welchen Einfluß die Bodenfeuchtigkeit auf die K-Verfügbarkeit hat. Ebenfalls soll untersucht werden, wie sich dieser Einfluß des Wassers bei verschiedener K-Versorgung des Bodens auf den Ertrag auswirkt. Um dieser Frage nachzugehen, muß zunächst mittels einer entsprechenden Technik versucht werden, zwei grundsätzliche Probleme zu lösen.

- a) Der Wassergehalt bzw. die Wasserspannung im Boden muß während der gesamten Versuchsdauer in den einzelnen Varianten konstant gehalten werden. Sowohl für die Vegetationszeit als auch für die unterschiedlichen Tiefen des Gefäßes gilt es, Schwankungen im Wassergehalt auszuschließen.
- b) Die Wirkung des Wassers auf die K-Verfügbarkeit muß eindeutig getrennt werden vom Einfluß, den das Wasser direkt auf das Pflanzenwachstum ausübt. D.h., die Pflanzen dürfen über die gesamte Vegetationszeit nicht an Wassermangel leiden, auch wenn im Versuch eine trockene Variante gefahren wird. Das gleiche gilt auch für sämtliche Pflanzennährstoffe, mit Ausnahme des zu untersuchenden. Die Pflanze muß gut ernährt sein, denn alle Versuchsvarianten sollten möglichst mit Pflanzen in gleichem physiologischen Zustand durchgeführt werden, damit man sie anschließend vergleichen kann.

Wenn diese Voraussetzungen gegeben sind, ist es möglich, die K-Aufnahmen der Pflanzen als Parameter für die K-Verfügbarkeit zu verwenden.

Um den oben gestellten Forderungen gerecht zu werden, wurde folgende Versuchsanordnung entwickelt.

1. Versuchsanordnung

Ein Gefäß aus Polyäthylen von der Größe 30 x 30 x 15 cm wird in drei gleich große Kammern unterteilt. Die mittlere Kammer wird mit Quarzsand gefüllt (im folgenden Nährlösungsmedium genannt), die beiden äußeren mit dem Versuchsboden (Bodenmedium) (Abb.3). Vorgekeimte Pflanzen werden

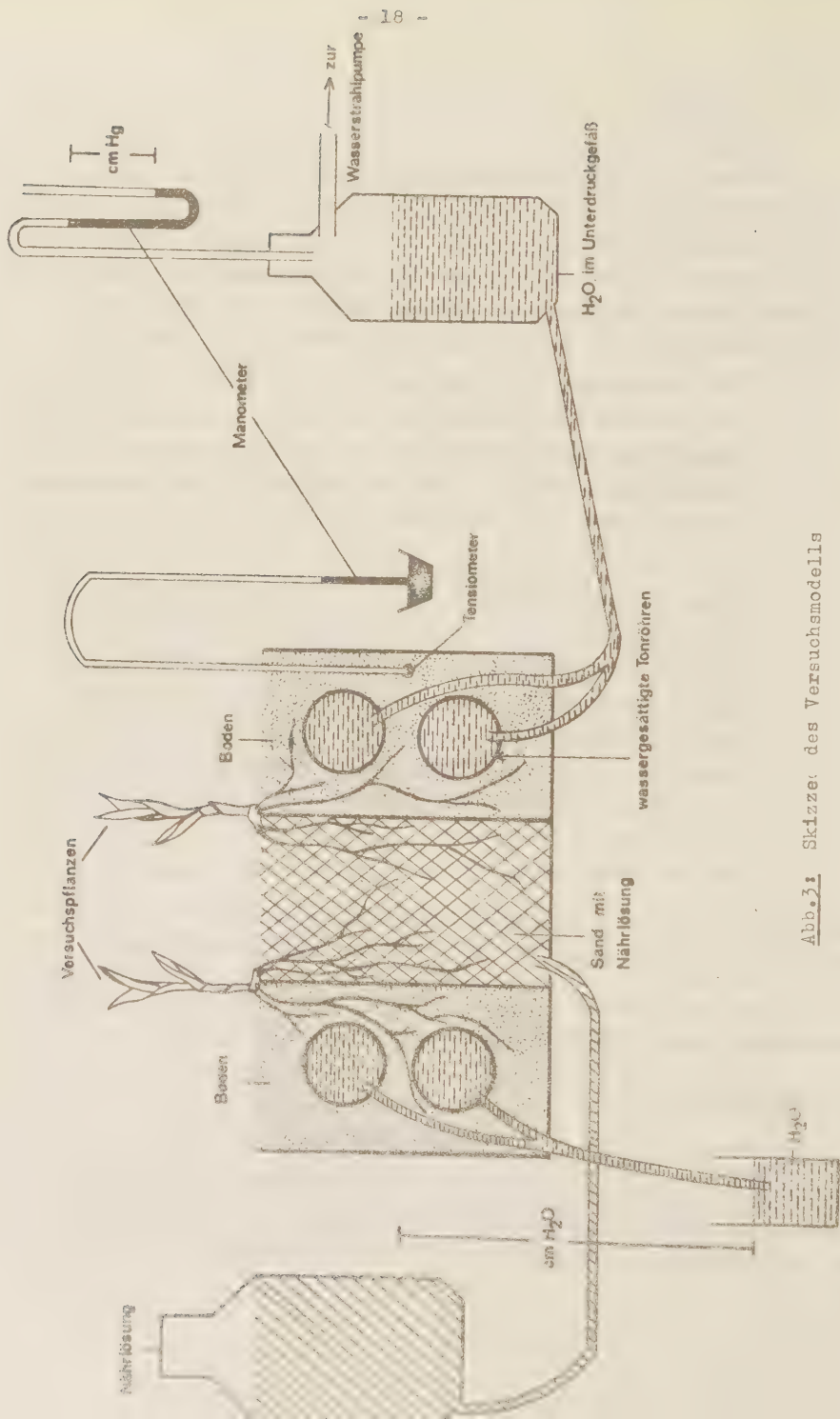


Abb. 3: Skizze des Versuchsmodells

nun so auf den Trennwänden zwischen den Kammern angesetzt, daß sie mit einem Teil der Wurzeln im Bodenmedium, mit dem anderen Teil im Nährlösungsmedium wurzeln können ("split-root"-Technik). Die Trennwände sollen aus diesem Grund nicht dicker als 0,3 - 0,4 cm sein. Den Pflanzen wird es somit ermöglicht, sich aus beiden Medien, dem Quarzsand und dem Boden, Wasser und Nährstoffe anzueignen. Der Quarzsand in der mittleren Kammer wird hierzu mit einer Nährlösung getränkt. Über einen Schlauch steht diese Nährlösung mit einem Reservegefäß in Verbindung. Durch Absenken und Anheben des Reservegefäßes kann der Nährlösungsstand im Quarzsand geregelt oder die Nährlösung ausgetauscht werden. Auch können mit diesem Mechanismus die Wurzeln im Sand zeitweise belüftet werden. Voraussetzung für ein gleichzeitiges und gleichmäßiges Durchwurzeln beider Medien ist, daß die Pflanze beim Ansetzen neben ihrer Primärwurzel mindestens noch zwei bis drei Sekundärwurzeln aufweist. Für die Versuchsanordnung eignet sich besonders die Maispflanze (*Zea mays*), die einen breiten Wurzelansatz am Samenkorn hat, im Gegensatz zu anderen Getreidearten, deren Wurzelansatz auf einen Punkt begrenzt ist. Die Maiswurzeln können bei normalem Wachstum sowohl den Quarzsand als auch den Boden erreichen, während die Getreidewurzeln jeweils in das gewünschte Medium geführt werden müßten (Abb.4).

Mit der Nährlösung, in der der zu untersuchende Nährstoff nicht enthalten sein darf, sollen der Pflanze alle Nährstoffe einschl. Wasser in ausreichender bzw. optimaler Menge zur Verfügung gestellt werden, natürlich mit Ausnahme des zu untersuchenden Nährstoffs. Der Pflanze wird es hierdurch ermöglicht, immer genügend Wasser und Nährstoffe aufzunehmen, auch wenn im Boden, den sie mit dem anderen Teil ihrer Wurzeln durchwächst, schlechte Feuchtigkeitsbedingungen herrschen. Das Pflanzenwachstum ist vom Bodenmedium unabhängig bis auf den zu untersuchenden Nährstoff. Diesen muß die Pflanze nun dem Boden unter kontrollierten Feuchtigkeitsbedingungen entziehen. Mit dieser "split-root" - Technik wird die oben aufgestellte Forderung, die Pflanze ausreichend mit Wasser und Nährstoffen zu versorgen, erfüllt.

In den beiden Kammern, die mit Boden gefüllt sind, muß nun im Boden die Feuchtigkeit in den verschiedenen Tiefen des Gefäßes über die



Abb.4: Wurzelansatz am Samenkorn bei **Mais** (a) und bei **Getreide** (b)
(schematisiert)

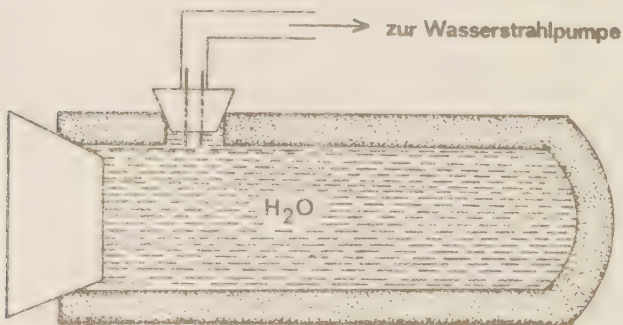


Abb.5: Tonröhre mit Abschlusskorken und Anschluß für die
Wasserzufuhr

gesamte Vegetationszeit konstant gehalten werden. Den Wassergehalt im Boden entspricht immer ein bestimmter Saugdruck, mit dem das Wasser im Boden festgehalten wird. Diese Saugspannung des Bodens (ausgedrückt in pF) läßt sich nun für die konstante Wasserversorgung ausnutzen. Hierzu werden in den Boden wassergesättigte Tonröhren eingelagert (Abb.3/5). Diese stehen mit einem Gefäß in Verbindung, in welchem mittels einer Wasserstrahlpumpe ein dem gewünschten pF - Wert entsprechender Unterdruck eingestellt wird (Abb.3 rechts). Das Wasser im Unterdruckgefäß ist gleichzeitig eine Wasserreserve zur Nachlieferung für die Bewässerung des Bodens. Durch den Saugdruck des Bodens wird den Tonröhren Wasser entzogen solange der Saugdruck ausreicht, den eingestellten Unterdruck zu überwinden. Das Wasser wird solange in Richtung Boden fließen, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Saugspannung und Unterdruck eingestellt hat. Bei einem Wasserentzug aus dem Boden durch die Pflanze oder Evaporation erhöht sich die Saugspannung wieder, und es kann wieder Wasser aus den Tonröhren bis zum neuerlichen Gleichgewicht angesaugt werden. Der Vorgang Wasserentzug aus dem Boden - Wiederaufnahme durch die Tonröhre ist ein kontinuierlicher Vorgang. Der Unterdruck im Reservegefäß muß des öfteren kontrolliert und nachgestellt oder durch ein Druckventil geregelt werden. Dieses entwickelte Modell kann nur bis zu max. pF 3, das entspricht einem Unterdruck von 1 atm bzw. 10 m Wassersäule, funktionieren, da mit der Wasserstrahlpumpe nur bis zu diesem Unterdruck gearbeitet werden kann. Außerdem würde bei höherem Unterdruck der Wasserfaden reißen und die kontinuierliche Wasserversorgung blockieren.

Für pF-Werte zwischen 0 und 2,0, entsprechend einer Wassersäule von 0 - 1 m, wird der Unterdruck nicht mit einer Wasserstrahlpumpe eingestellt, denn die Einstellung ist in diesem Bereich zu ungenau. Hier genügt es, wenn ein entsprechender Höhenunterschied zwischen Tonröhren und Wasserspiegel im Reservegefäß besteht und die Saugspannung des Bodens diesen überwinden muß (Abb.3 links).

Es ist darauf zu achten, daß das System Tonröhre - Schlauch - Unterdruckgefäß luftfrei ist, damit das Wasser kontinuierlich fließen kann. Auch ist es notwendig, daß die Porengröße bei dem verwendeten Tonmaterial so gewählt wird, daß bei dem gewünschten Unterdruck noch alle

Poren mit H_2O gefüllt sind. Hierzu eignet sich bei einem Unterdruck von 0 - 0,5 atm oder pF 0 - pF 2,4 " Schumacher Filterkerzen Bd " (Porengröße 4-7/ μ) (50/30 mm ϕ , 255 mm lang). Für einen pF - Wert von 2,5 - 3 oder einem Unterdruck von 0,5 - 1 atm sind " Schumacher Diaphragmenkerzen " " Diapor 8 G " * (Porengröße 1,8 - 2/ μ) (50/44 mm ϕ , 255 mm lang) geeignet und verwendet werden.

Die Kerzen sind von der Fabrik her einseitig verschlossen. Die andere Seite muß nun ebenfalls luftdicht verschlossen sowie ein Anschluß - röhrrchen für die Schlauchverbindung angebracht werden. CZERNAZY (1966) schlägt vor, diese Anschlußröhrrchen aus Kupfer am Kerzenende mit Kunstharz einzuießen. Bei Versuchen mit verschiedenen Kunstharzen (Vestopal, Epoxydharz MH 780 + Veramid 140 **, Patex) zeigt sich aber, daß bei höheren Unterdrücken (ab ca. 0,6 atm) die Verbindung Kunstharz - keramisches Material nicht einwandfrei luftdicht abschließt, außerdem können die in der Tonröhre beim Sättigen mit Wasser zurückgebliebenen Luftblasen nicht restlos aus dem System entfernt werden. Bei den hier beschriebenen Versuchen hat es sich bewährt, die Tonröhren am offenen Ende mit einem Gummistopfen abzuschließen, der mit etwas Silikonfett bestrichen ist. Um das Anschlußröhrrchen anzubringen, wird die Tonröhre auf ihrer Längsseite angebohrt (nur in wassergesättigtem Zustand bohren). Dieses Loch wird mit einem durchbohrten Gummistopfen und in dieser Bohrstelle befindlichen Kupferrohr verschlossen (Abb.5). Das Verschließen der Tonröhren erfolgt am besten unter Wasser, so daß keine Luftblasen eingeschlossen werden. Evtl. noch vorhandene Luftblasen lassen sich bei waagerechter Lage der Röhren und senkrecht nach oben stehenden Anschlußröhrrchen leicht absaugen.

Um das System auf Luftblasen zu kontrollieren, ist es zu empfehlen, durchsichtiges Schlauchmaterial zu verwenden.

Selbstverständlich ist für die Bewässerung entsalztes Wasser zu verwenden, um dem Boden keine Nährstoffe zuzuführen. Es zu gewährleisten,

* Schumacher'sche Fabrik, 712 Bietigheim/Württbg.
Postfach 207

** Schering A.G., Berlin

daß in dem gesamten Bodenmedium die gleiche Wasserspannung und eine kontinuierliche Wasserbewegung herrscht, darf die die Tonröhre umhüllende Bodenmenge an keiner Stelle dicker als 3 - 4 cm sein.

Bei dem vorliegenden Modell, in dem eine Kammer die Maße 9 x 30 x 15 hat, werden zwei Tonröhren mit den Maßen von 5 cm ϕ und 25 cm Länge übereinander eingebracht, die umhüllende Bodenmenge ist hier max. 3 cm stark. Um eine günstige Porengröße im Boden zu erreichen, wird der Boden auf 2-3 mm Krümelgröße gemahlen und lufttrocken in die Kammern eingefüllt. Auf einen guten Kontakt Boden-Tonröhre ist zu achten. Die Verwendung von Tonröhren, die in den Boden eingelagert werden und nicht von Tonplatten am Grunde des Gefäßes, wie MOSS (1964) es vorgeschlagen hat, hat den Vorteil, daß die Nachlieferung des Wassers in alle Richtungen geschehen kann. Außerdem können die Pflanzenwurzeln auch noch an den Tonröhren vorbei nach unten wachsen und sammeln sich so nicht alle an dem Tonmaterial am Grunde des Gefäßes. Die Tonröhren einer Kammer müssen am gleichen Unterdruckgefäß angeschlossen sein, damit das Wasserangebot für beide Röhren unter den gleichen Bedingungen erfolgt. Zu empfehlen ist es, diesen Versuch unter konstanten Temperaturen und Luftfeuchtigkeitsbedingungen in einer Klimakammer durchzuführen, denn hier sind die Versuche reproduzierbar und es treten keine allzu großen Schwankungen in der Evaporation auf.

Um die tatsächliche Wasserspannung in den verschiedenen Tiefen des Bodens zu kontrollieren, wurden in unterschiedlichen Höhen kleine Tensiometer eingesetzt. Diese bestehen aus einer mit Wasser gesättigten permeablen Tonzelle, die über einen wassergefüllten Schlauch mit einem Quecksilbergefäß in Verbindung stehen (Abb. 3). Der Boden entnimmt, dem Gleichgewicht entsprechend, der Tonzelle Wasser oder gibt an diese Wasser ab, der Quecksilberspiegel im Schlauch steigt oder fällt. Die Meßskala wird in pF -Werten geeicht, so daß sofort der gewünschte pF -Wert angegeben werden kann. Für die Tonzelle wurde das gleiche Material verwendet wie für die Tonröhren (Schumacher Filterkerzen "Bd" Porengröße 4,7 μ). Die Tonzellen haben eine Größe von 1 cm ϕ und 1,5 cm Länge. Sie werden angebohrt und an den Plastikschauch direkt mit Patex angeklebt. Auch hier ist wieder auf ein luftfreies System zu achten; deshalb wurde luftfrei gekochtes, entsalztes Wasser

zur Sättigung der Tonzellen und Füllung der Schläuche verwendet. Da sich kein völlig luftdichtes, durchsichtiges Plastik-Schlauchmaterial finden ließ, mußten die Luftblasen im Schlauch mindestens einmal wöchentlich entfernt werden, um zu genauen Meßergebnissen zu kommen.

(Die Tensiometer wurden angefertigt nach Angaben von Dr. Becker aus dem Institut für Bodenkunde der TH Hannover).

2. Versuchsdurchführung

Als Ausgangsmaterial diente eine Schwarzerde aus dem Raum Algermissen-Hildesheim. Ausgewählt wurde dieser Boden wegen seiner günstigen Wasserführung, bedingt durch die Korngrößenzusammensetzung und seinen niedrigen Gehalt an austauschbarem K (Tab.1,2).

Tab.1: Korngrößenzusammensetzung, pH-Wert und Gehalt an org.Substanz des Versuchsbodens (Schwarzerde)

Korngrößenzusammensetzung:

Ton	0,2 / μ	-	18,5%
Feinschluff	0,2 - 0,6 / μ	-	4,5%
Mittelschluff	0,6 - 2 / μ	-	29,1%
Grobschluff	2 - 6 / μ	-	57,9%

pH = 6,8

org.Substanz = 3,7%

Tab.2: Gehalt an austauschbarem K (mg K/100 g Boden), K-Konzentration des Bodensättigungsextraktes (BSE) (mval K/l), K-Sättigung (mg K/g Ton), absolut und prozentual, und zugegebene Düngermengen (mg K/100 g Boden)

	mg/100 g B austauschb.K	mval K/l in BSE	K - Sättigung mg/g Ton	%	zugegebene Dünger- mengen mg K/100 g B
K ₋₁	7,5	0,02	0,4	2,2	-
K ₀	11,0	0,08	0,6	3,0	-
K ₁	17,0	0,14	0,9	4,5	9
K ₂	31,0	0,47	1,7	8,5	29
K ₃	46,0	1,07	2,5	12,5	49

Für die einzelnen Versuchsvarianten wurde der Boden unterschiedlich mit K_2SO_4 gedüngt. Um die Düngermenge gleichmäßig in den Boden einzubringen, wurden 30 kg Boden 3 Wochen vor Ansetzen des Versuches mit dem Dünger trocken gut durchmischt, anschließend durchfeuchtet, noch einmal durchmischt, getrocknet und auf 2-3 mm Krümelgröße gemahlen. Andere Nährstoffe wurden nicht gedüngt. Bei der Variante K_{-1} wurde die Bodenmenge zunächst mit $CaCl$ -Lösung durchwaschen, um eine gewisse Menge an K mit Ca auszutauschen und auszuwaschen. Anschließend wurde mit reichlich entsalztem Wasser nachgewaschen, um die überschüssigen Ca^{++} und Cl^- - Ionen aus dem Boden zu entfernen. Die Werte der einzelnen Düngungsstufen sind in Tab.2 zusammengefaßt.

Der Versuch umfaßte $5 \times 4 = 20$ verschiedene Varianten, nämlich 5 K - Düngungsstufen bei 4 Feuchtigkeitsvarianten (pF 1,6; 2,0; 2,4 und 2,7). Für die pF-Varianten 2,4 und 2,7 wurde der Unterdruck wie oben beschrieben mit der Wasserstrahlpumpe eingestellt. Bei pF 1,6 und pF 2,0 wurde das Reservewassergefäß mit einem Höhenunterschied von 0,4 m bzw. 1 m zum Niveau der Tonröhren aufgestellt.

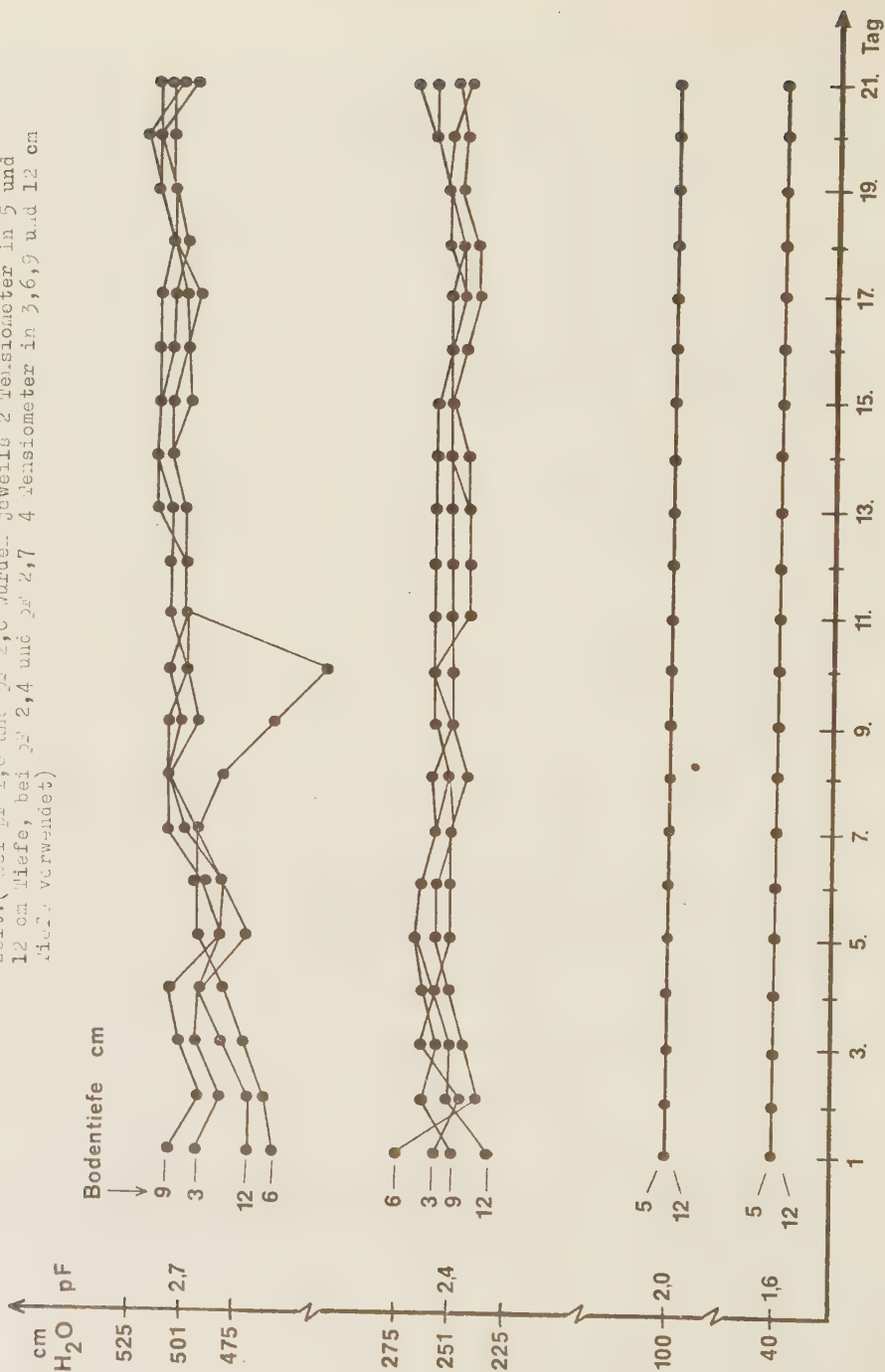
In der Tab.3 sind die Werte für die Wasserspannung sowie die dazugehörigen Wasser- und Luftgehalte angegeben.

Tab.3: Wasser- und Luftgehalte des Versuchsbodens bei verschiedenen Wasserspannungen in Gewichtsprozenten (Gew.%) und Volumenprozenten (Volumen %)

	Gew. %	Volumen %			% WK
		H ₂ O	Boden	Luft	
pF 1,6	48	51	45	4	82
pF 2,0	38	39	45	16	69
pF 2,4	28	27	45	28	51
pF 2,7	22	19,5	45	35,5	40

Die Abb.6 zeigt den Verlauf der Wasserspannungskurven während der Vegetationszeit der vier Feuchtigkeitsvarianten einer K-Düngungsstufe.

Abb. 6: Verlauf der Wasserspannungskurven (s.) während der Vegetationszeit, (bei pF 1,6 und pF 2,0 wurden jeweils 2 Tensiometer in 5 und 12 cm Tiefe, bei pF 2,4 und pF 2,7 4 Tensiometer in 3, 6, 9 und 12 cm Tiefe verwendet)



Bei den Versuchsvarianten pF 1,6 und pF 2,0 wurde mit jeweils 2 Tensiometern in der Tiefe von 5 cm und 12 cm die Wasserspannung kontrolliert.

Bei den Varianten pF 2,4 und pF 2,7 wurde mit jeweils 4 Tensiometern in Tiefen von 3,6,9 und 12 cm die Wasserspannung kontrolliert. Auf der Ordinate sind die pF-Werte und die Saugspannung in cm Wassersäule aufgetragen. Die Kurven zeigen, daß bei pF 1,6 und pF 2,0 keinerlei Schwankungen im Wassergehalt oder der Wasserspannung in den verschiedenen Tiefen und während der Vegetationszeit auftraten.

Bei pF 2,4 bewegten sich die Schwankungen nur im Bereich von max. 10-15 cm Wassersäule. Wie aus der pF - Kurve für diese Schwarzerde in Abb.7 zu ersehen ist, machten die Wasserspannungsschwankungen nur eine Änderung von 1% im Wassergehalt aus.

Die Tensiometer bei pF 2,7 benötigten 5 Tage, bis sie sich auf den gewünschten Wert eingestellt hatten. Der Abfall der einen Kurve zwischen dem 12. und 16.Tag wurde dadurch bedingt, daß Luft in das Tensiometer geriet. Nach Beseitigung dieser Luftblasen trat auch hier ein Gleichgewicht ein, welches sich bis zum Ende der Vegetationszeit hielt. Auch bei pF 2,7 treten nur Schwankungen von weniger als 1% Wassergehalt auf.

Die Nährlösung für die mit Quarzsand gefüllten Kammern des Versuchsgefäßes hatte die in Tab.4 aufgeführte Zusammensetzung und Konzentration.

Tab.4: Zusammensetzung und Konzentration der Nährlösung

10^{-3} mol/l			
NH_4NO_3	0,7	CaCl_2	1,3
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times 2 \text{H}_2\text{O}$	0,16	Na_2SO_4	0,16
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \times 6 \text{H}_2\text{O}$	0,3		
10^{-6} mol/l			
Fe-Chelat	10	CuSO_4	1,4
MnSO_4	14	ZnSO_4	1,4
H_2BO_3	10	NH_4 -Molybdat	0,3

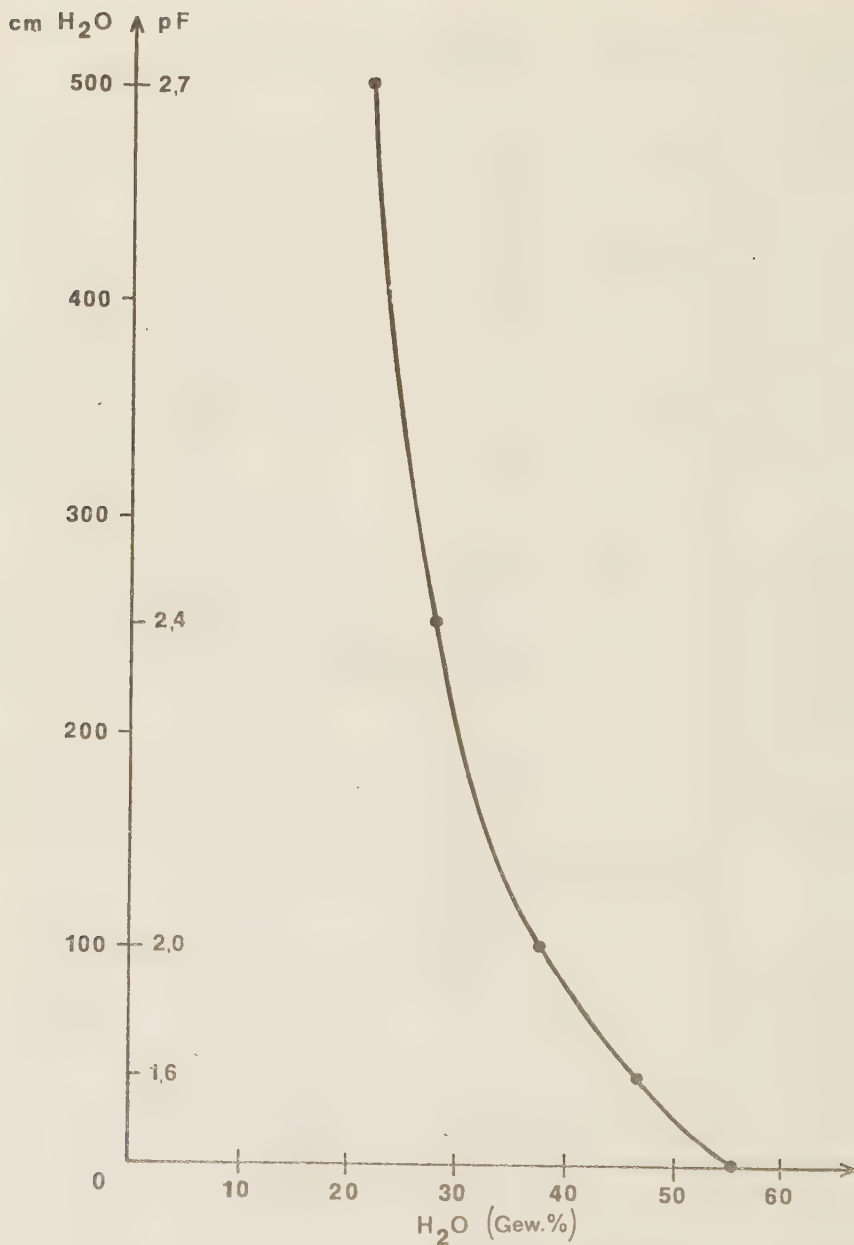


Abb.7: Wassergehalt (Gew.%) in Abhängigkeit von der Wasserspannung (pF) des Versuchsbodens.

Die Nährlösungsmedien der vier Versuchsvarianten waren gemeinsam an ein 10 l-Reservegefäß angeschlossen. Täglich einmal wurde die Nährlösung für 1 - 1 1/2 Std. abgelassen, um die Wurzeln zu belüften. Ausgewechselt wurde die Lösung alle 7 Tage, so daß die Pflanzen bei einer Vegetationszeit von 21 Tagen dreimal neue Lösung erhielten.

Als Versuchspflanze diente Zea Mays (Sorte Hybridmais KC 3). Die Körner wurden auf einem Drahtnetz über einer Wanne mit dest. Wasser vorgekeimt. Nach ca. 8 Tagen, sobald sich das erste Blatt entrollt hatte und die Pflanzen neben der Primärwurzel mindestens 2 - 3 Sekundärwurzeln von 5 cm Länge hatten, wurden die Pflanzen in das Versuchsgefäß eingesetzt. Sie wurden jeweils so eingepflanzt, daß die Primärwurzel mit einer Sekundärwurzel in das Nährlösungsmedium eintauchte; die anderen Sekundärwurzeln wurden in den Boden geleitet.

Vor dem Einpflanzen wurde das Samenkorn mit dem Endosperm vom Keimling getrennt, damit die Pflanze keine Nährstoffe mehr aus dem Endosperm, dem Reservoir an Nährstoffen für den Keimling, erhalten konnte. In ein Versuchsgefäß = 1 Versuchsvariante - jeweils 2 Kammern mit Boden und eine Kammer in der Mitte mit Nährlösung (s. Abb. 3) - wurden insgesamt 12 Pflanzen - auf jede Trennwand 6 - gepflanzt.

Die Versuchsdauer betrug vom Tage des Einsetzens der vorgekeimten Pflanzen 21 Tage. Bei der Ernte wurden die Pflanzen direkt an der Bodenoberfläche abgeschnitten.

Die Wurzeln wurden getrennt nach den einzelnen Kammern durch Auswaschen des Bodens bzw. des Quarzsandes mit entsalztem Wasser gewonnen. Das Einzelgewicht der Wurzeln für jede Pflanze konnte nicht ermittelt werden, da die Wurzeln der einzelnen Pflanzen zu sehr miteinander verwachsen waren. Auch die Mineralstoffgehalte der Wurzeln wurden jeweils für die Wurzeln einer Kammer bestimmt.

Die Versuche wurden in der Klimakammer durchgeführt. Die Tageslänge betrug 12 h bei ca. 10 000 Lux. Die Temperatur betrug am Tage 23°C bei 80 % Luftfeuchte, in der Nacht 15°C bei ebenfalls 80 % Luftfeuchte.

3. Analytik

Im Boden wurde der pH-Wert, die Korngrößenzusammensetzung und die org. Substanz bestimmt.

Die Mineralstoffgehalte wurden mit folgenden Methoden zu Beginn des Versuches bestimmt:

- a) K-Gehalt mit der Doppellaktatmethode
- b) K, Mg, Ca-, Na-Gehalt durch Extraktion mit 1 n NH_4 - Acetat
- c) K-Konzentration des Bodensättigungsextraktes (BSE)
- d) K-Diffusionsrate

Bei der Extraktion der Bodenlösung treten Schwierigkeiten auf, falls man sie bei verschiedenen pF-Werten aus dem Boden gewinnen will. Die Methode nach RICHARDS (1941), bei der die Bodenlösung durch eine Filtermembran abgesaugt wird, eignet sich gut für Feuchtigkeitsgehalte um die Feldkapazität. Liegen höhere pF-Werte vor, so läßt sich diese Methode nicht mehr anwenden, da dann kein kontinuierliches Absaugen der Lösung aus dem Boden mehr möglich ist. EATON et al. (1960), die die Methode leicht abgewandelt haben, arbeiten auch nur bei pF 2.

MOSS (1964) trennt das Bodenwasser vom Boden mittels Äthylalkohol. Beim Trennungsvorgang in 150 cm langen Röhren treten allerdings Austauschvorgänge mit den Bodenkolloiden auf, die das Ergebnis verfälschen können. Eigene Versuche, die Bodenlösung mit Drucken bis zu 100 atm anzupressen, scheiterten bisher ebenfalls an den Austauschvorgängen in der Filtermembran.

So muß man sich vorläufig mit den Konzentrationsangaben des Bodensättigungsextraktes (= BSE) begnügen. Beim BSE wird der Boden so lange mit Wasser verrührt, bis alle Poren mit Wasser gefüllt sind, die Bodenoberfläche glänzt, aber noch kein freies Wasser austritt. In dieser Paste stellt sich ein Gleichgewicht zwischen wasserlöslichen und austauschbaren Ionen ein, was nach Angaben von RICHARDS (1941) und NEMETH et al. (1970) nach 24 h erfolgt ist. Nun wird die Lösung über ein Tonfilter mit einer Vakuumpumpe abgesaugt und analysiert. Der BSE wird verwendet, weil diese Methode gut reproduzierbare Werte liefert.

Die angegebenen K-Diffusionsraten wurden mit der Technik von KAUFFMAN u. BOUDLIER (1967), leicht abgewandelt von GRILLME et al. (1971) ermittelt. Es handelt sich um die Mengen an K-Ionen, die in einer bestimmten Zeit (7 Tage) aus einer bestimmten Bodenmenge (Zylinder $\varnothing$ 4,5 cm, Höhe 3 cm)

in ein Ionenaustauscherharz hinein diffundieren. Boden und Ionenaustauscherharz (- Dowex 50 W 8 - belegt mit H-Ionen) sind auf gleiche Wasserspannung gebracht, um eine Wasserbewegung im System auszuschließen. Hierzu werden beide mit Wasser gesättigt und anschließend durch einen dem entsprechenden pF-Wert eingestellten Druck ausgepreßt.

Der Zylinder, in dem sich der Ionenaustauscher befindet, wird auf den Bodenzylinder gesetzt, nachdem er vorher mit einer Dialysiermembran abgedeckt wurde, um eine Berührung von Boden und Ionenaustauscher zu verhindern. Beide Zylinder werden in einem weiteren zylindrischen Behälter aufeinander gepreßt und luftdicht verschlossen. Nach einer Woche wird die Menge an K, die in den Ionenaustauscher hinein diffundiert ist, gemessen.

Bei den Pflanzen wurde der Ertrag getrennt nach oberirdischem Teil und Wurzel ermittelt. Beim oberirdischen Teil wurde der Ertrag für jede Pflanze gesondert festgestellt, und zwar Frischgewicht und Trockengewicht; getrocknet wurde bei 105° C im Trockenschrank.

Der Wurzelertrag wurde getrennt nach Kammern (= Variante) ermittelt. Hier wurde nur die Trockensubstanz bei 105° C festgestellt. Die Frischsubstanzgewichte erwiesen sich als nicht reproduzierbar, da die Wurzeln beim Auswaschen unterschiedlich stark befeuchtet wurden.

Ein aliquoter Teil des Pflanzenmaterials wurde trocken verascht, mit 2 : 1 verdünnter HNO_3 aufgekocht, und nach Zugabe von 20 % HCl und entsprechender Verdünnung wurden die Mineralstoffe K und Na mit dem Flammenfotometer, Ca und Mg mit dem Absorptionsspektrometer, bestimmt.

IV Ergebnisse

Bei der Darstellung der Ergebnisse werden immer 12 Pflanzen (= ein Versuchsgefäß) zu einer Versuchsvariante zusammengefaßt. Zur Kennzeichnung eines Versuchsgliedes wird die Düngungsstufe und die Wasserspannung angegeben, z.B. $\text{K}_0/\text{pF } 2,0$.

1. Die Ertragsbildung sowie Kaliumaufnahme und Kaliumgehalt der oberirdischen Pflanzenmasse

Schon wenige Tage nach Ansetzen des Versuches bei den einzelnen

Versuchsvarianten ein Unterschied in der Pflanzenhöhe festgestellt werden. Bei gleicher Düngungsstufe, aber unterschiedlicher Durchfeuchtung, blieben die trockeneren Varianten von pF 2,4 und pF 2,7 im Wachstum gegenüber den Pflanzen bei pF 2,0 zurück. Die Abb. 8 - 11 zeigen den Wachstumsverlauf in Abständen von 8 Tagen der Varianten K_1 /pF 2,0 und K_1 /pF 2,7.

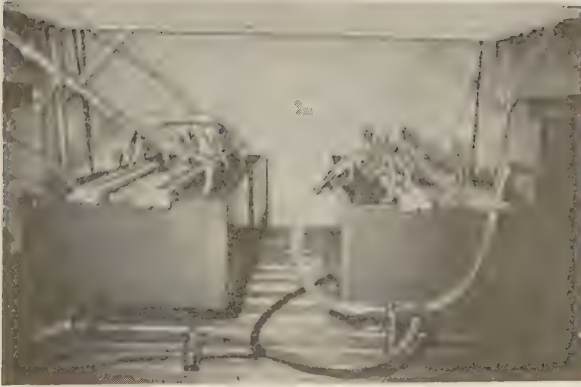
Zur Zeit der Ernte zeigten die Pflanzen bei allen Düngungsstufen in der Variante pF 2,0 den höchsten Wuchs (Tab.5).

Tab.5: Pflanzenhöhe in cm ($\emptyset$ pro Variante) zur Zeit der Ernte

K/pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K_{-1}	32	37	25	25
K_0	30	37	27	25
K_1	40	44	27	27
K_2	45	48	38	30
K_3	50	50	47	36

Bei starker Durchfeuchtung (pF 1,6) war das Wachstum etwas gehemmt, ebenso wie bei den trockeneren Varianten pF 2,4 und pF 2,7. Die Pflanzen in den Varianten bei pF 2,7 erreichten in der jeweiligen Düngungsstufe nur ca. 70% der Höhe, die bei pF 2,0 erreicht wurde.

In den einzelnen Feuchtigkeitsstufen ist ein Ansteigen der Pflanzenhöhe mit Erhöhung des K-Niveaus im Boden zu beobachten. Die Varianten K_0 und K_{-1} verhalten sich etwa gleich, obwohl bei Variante K_{-1} versucht wurde, K^+ mit Hilfe von Ca^{++} auszutauschen und auszuwaschen und damit das K-Niveau im Boden zu erniedrigen. Die Analysendaten des Bodens gleich nach dem Auswaschungsvorgang geben für K_{-1} auch niedrigere K-Werte als für K_0 an. Eine Reaktion im Pflanzenwachstum ist aber nicht zu erkennen, wie weiter unten mit anderen Daten noch gezeigt wird. Beachtlich beim Pflanzenwachstum ist die Zunahme in der Pflanzenhöhe



Aug. 3 In the middle of the river.



Aug. 4 In the middle of the river.



Journal of Management Education 35(10) 1039-1050

zwischen den Varianten K_2 und K_3 bei pF 2,4 und pF 2,7. Hier ist nochmals ein Zuwachs von 9 bzw. 6 cm zu verzeichnen.

Ein sichtbarer Kalimangel war nur in den Varianten K_0 /pF 2,7 und K_{-1} /pF 2,7 nach ca. 6 Tagen an den Spitzen der älteren Blätter zu erkennen, der sich nach wenigen Tagen jedoch wieder verwuchs. Nach 14 Tagen ließ die Standfestigkeit in den Varianten K_{-1} /pF 2,0 und K_{-1} /pF 1,6 nach, die Pflanzen mußten gestützt werden.

In der Feuchtigkeitsstufe pF 2,7 zeigten die Pflanzen der Düngungsstufen K_{-1} bis K_2 stets ein etwas helleres Aussehen als die Pflanzen bei besserer Durchfeuchtung. Ausgeprägte Kali-Mangel-Symptome waren aber nicht zu sehen. Dieser Unterschied in der Grünfärbung gegenüber den anderen Versuchsgliedern war bei der Variante K_3 /pF 2,7 nicht festzustellen.

Die Wachstumsbeobachtungen spiegeln sich in den Ertragswerten wieder. Die Durchschnittserträge pro Pflanze (Tab. 6) zeigen dieselbe Tendenz wie sie auch schon bei der Pflanzenhöhe zu beobachten war.

Tab. 6: Durchschnittsertrag (x in g/TS) und Standardabweichung (s) pro Pflanze der einzelnen Versuchsvarianten

K \ pF		1,6	2,0	2,4	2,7
K_{-1}	x	0,306	0,446	0,318	0,291
	s	0,117	0,132	0,107	0,099
K_0	x	0,313	0,387	0,295	0,290
	s	0,163	0,124	0,090	0,057
K_1	x	0,508	0,533	0,400	0,252
	s	0,180	0,150	0,133	0,104
K_2	x	0,578	0,677	0,457	0,332
	s	0,164	0,182	0,130	0,186
K_3	x	0,676	0,714	0,632	0,496
	s	0,230	0,189	0,175	0,066

Die Abweichung vom Mittelwert der einzelnen Pflanze ist z.T. jedoch recht erheblich. Die Schwankungen im Trockengewicht der Einzelpflanzen können ihren Ursprung in unterschiedlichen genetischen Material haben. Aber auch Schwierigkeiten beim Anwachsen der vorgekeimten Pflanzen im Versuchsgefäß und damit unterschiedliche Startbedingungen, die in drei Wochen Vegetationsdauer nicht mehr ausgeglichen werden können, haben Anteil an den Ertragsschwankungen.

In Abb.12 sind die Erträge der einzelnen Versuchsvarianten (12 Pflanzen) in g Trockensubstanz gegen die pF-Werte des Bodens aufgetragen. Innerhalb der einzelnen Düngungsstufen wurden bei pF 2,0 die höchsten Erträge erzielt, mit zunehmender Trockenheit verringert sich der Ertrag. Je nach Düngungsstufe beträgt der Ertragsrückgang zwischen pF 2,0 und pF 2,7 20 bis 50% (Tab.7).

Tab.7: Relative Ertragsmenge (%) im Verhältnis zur Variante mit dem Höchstertrag ($K_3/pF\ 2,0 = 100\%$)

K \ pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K_{-1}	42,0	62,7	44,7	41,0
K_0	44,0	58,3	41,5	41,0
K_1	71,0	75,0	55,7	35,4
K_2	81,5	95,2	64,0	46,6
K_3	95,0	100,0 ===	88,8	70,0

In den Varianten K_0 und K_{-1} ist er mit 20% am niedrigsten, aber hier liegt bereits der Ertrag bei pF 2,0 nicht sonderlich hoch. Der stärkste Abfall ist in den Varianten K_1 und K_2 mit 50% zu verzeichnen, bei Variante K_3 ist er mit 30% nicht mehr so stark. Der Ertragsabfall von pF 2,0 nach pF 2,7 ist in den Varianten K_0 und K_{-1} signifikant, in den Varianten K_1/K_2 und K_3 hochsignifikant gesichert (Tab.8). Auch die Varianten mit dem höchsten Wassergehalt bei pF 1,6 erreichten nicht die Erträge, die in der jeweiligen K-Stufe bei pF 2,0 erzielt wurden.

(Abb.12)

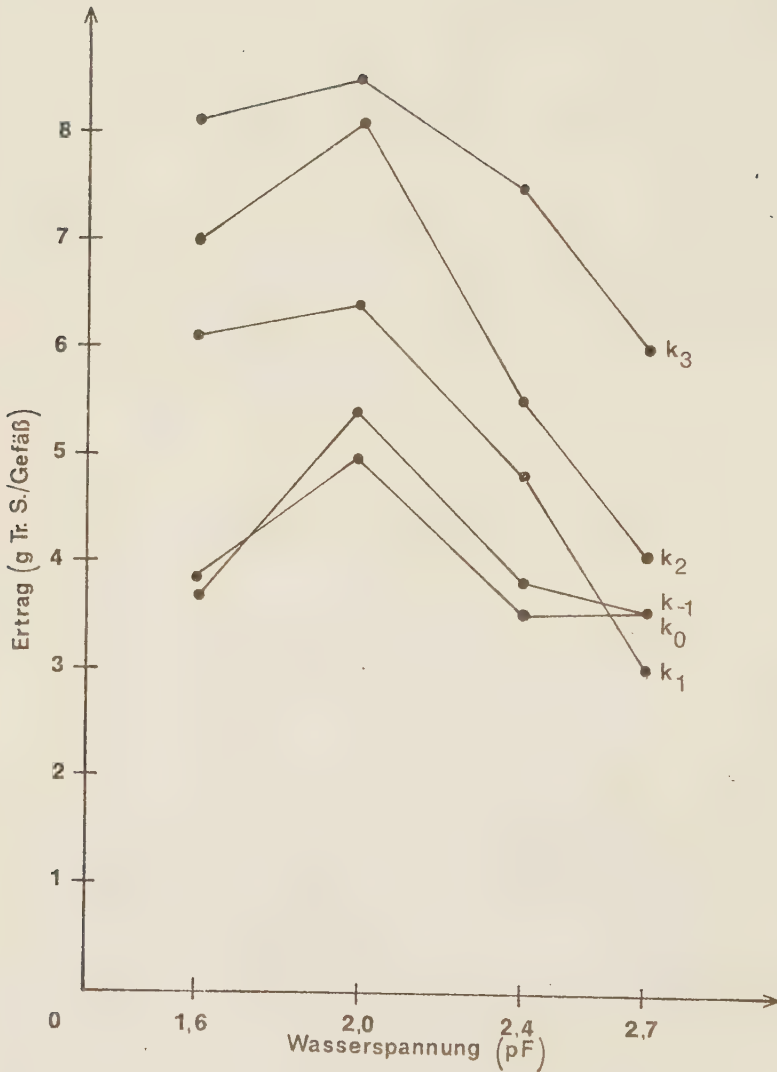


Abb. 12: Beziehung zwischen der Wasserspannung (pF) im Boden und dem Ertrag (g Tr.S./Gefäß) der Sprosse bei unterschiedlichem K-Niveau (K_{-1} - K_3)

Wenn auch der Ertragszuwachs von pF 1,6 nach pF 2,0 statistisch nicht gesichert ist (Tab.8), so läßt er sich aber zumindest in der Tendenz klar erkennen.

Mit steigendem K-Gehalt im Boden steigen auch die Erträge innerhalb jeder Feuchtigkeitsstufe an. Diese Zunahmen sind statistisch gesichert (Tab.8). Bei pF 2,4 steigt der Ertrag zwischen den Varianten K_0 und K_2 nur um etwa 30% an, erzielt aber dann zwischen den Varianten K_2 und K_3 nochmals eine Zunahme von weiteren 25%. Noch klarer tritt dieser Sprung im Mehrertrag bei pF 2,7 zu Tage. Hier wurde zwischen den Varianten K_0 und K_2 kein signifikanter Mehrertrag erzielt, die Ertragssteigerung bei Variante K_3 um knapp das doppelte ist jedoch hoch gesichert (Tab.8). Die Erträge der Frischsubstanz entsprechen in ihrer Tendenz den Trockensubstanzerträgen (Tab.9).

Tab.9: Ertrag an Frischsubstanz der Sprosse (g FS/Gefäß = 12 Pflanzen)

K \ pF	pF 1,6	2,0	2,4	2,7
K_{-1}	53,7	53,3	37,0	31,8
K_0	40,4	57,0	35,9	31,3
K_1	64,6	71,5	46,9	29,3
K_2	70,1	101,8	54,0	37,3
K_3	97,0	103,9	99,5	70,5

Der Trockensubstanzgehalt schwankte bei den Varianten K_{-1} bis K_2 zwischen 7,6 und 11,1% (Tab.10). Am höchsten war er bei einer Wasserspannung im Boden von pF 2,4 und pF 2,7; bei pF 2,0 ging er leicht zurück. Die Wirkung der Bodenfeuchte auf den Gehalt an Trockensubstanz resultiert jedoch nicht aus der Wasser-, sondern aus der K-Versorgung. Dementsprechend hatten die Pflanzen der K_3 - Düngungsstufe in allen Feuchtigkeitsvarianten einen niedrigeren Anteil an Trockensubstanz. Er lag hier nur bei 7,6 - 8,4%.

Tab.10: Gehalt an Trockensubstanz (% d.Frischsubst.)

K \ pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K ₋₁	10,8	10,0	10,3	11,0
K ₀	9,3	8,7	9,8	11,1
K ₁	9,3	8,9	10,1	10,3
K ₂	9,9	8,0	10,1	10,7
K ₃	8,4	8,2	7,6	8,4

Der K-Entzug der oberirdischen Pflanzenteile der einzelnen Versuchsglieder, der in Abb.13 gegen die Wasserspannung aufgetragen ist, zeigt etwa dasselbe Bild wie die Ertragskurven (Abb.12). Die absoluten Werte sind in Tab.11, die relativen Werte zur Variante mit dem höchsten K-Entzug, auch hier wiederum K₃/pF 2,0, in Tab.12 aufgeführt.

Tab.11: K-Entzug der Sprosse (mg K/Gefäß)

K \ pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K ₋₁	83	119	60	41
K ₀	70	104	66	48
K ₁	232	224	158	76
K ₂	264	360	191	113
K ₃	453	486	425	292

Die Abb.13 macht deutlich, daß ein starker Zusammenhang zwischen Wassergehalt des Bodens und K-Aufnahme der Pflanze besteht. Die beste K-Aufnahme erfolgt bei guter Durchfeuchtung (pF 2,0) bei allen K-Düngungsstufen. Mit steigender Wasserspannung im Boden verringert sich

Tab.12: Relativer K-Entzug (%) im Verhältnis zur Variante mit dem höchsten K-Entzug ($K_3/pF\ 2,0 = 100\%$)

K \ pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K_{-1}	17	24	12	8
K_0	14	21	13	9
K_1	47	46	32	15
K_2	54	73	39	23
K_3	93	100 ===	87	59

der K-Entzug der Pflanzen jedoch unterschiedlich stark bei verschiedenen hohem K-Niveau im Boden.

Auch wenn der Boden zu stark befeuchtet war (pF 1,6), ging der K-Entzug zurück. Der Abfall in der K-Aufnahme von pF 2,0 nach pF 1,6 war ebenso wenig signifikant gesichert (Tab.13) wie der Ertragsrückgang bei diesen pF-Werten, zeigt aber eine klar abnehmende Tendenz.

Hoch signifikant gesichert dagegen ist die Verringerung der K_{-1} Aufnahme bei einer Zunahme der Wasserspannung von pF 2,0 auf pF 2,4 bzw. pF 2,7 (Tab.13). Der Abfall der Kurven tritt beim K-Entzug (Abb.13) stärker hervor als beim Ertrag (Abb.12). Der Ertragsrückgang liegt bei Abnahme des Wassergehaltes im Boden von 48 Gew.% (pF 2,0) auf 22 Gew.% (pF 2,7) zwischen 20% und 50% bei den einzelnen Düngungsstufen (Tab.12), die Verringerung der K-Aufnahme jedoch bewegt sich zwischen 40 und 70%.

Aber nicht nur die unterschiedliche Wasserspannung im Boden, sondern auch die verschieden hohe K-Düngung hatte einen klaren Einfluß auf die K-Aufnahme der Pflanzen. Die K-Entzugswerte der Varianten K_0 und K_{-1} unterscheiden sich kaum. Sie schwanken innerhalb der einzelnen Feuchtigkeitsstufen nur um höchstens 3%. Die Höchstertragsvariante dieser Düngungsstufen entzog dem Boden bei pF 2,0 jedoch nur 25% der K-Menge, welche von der Höchstertragsvariante der Düngungsstufe K_3 ($K_3/pF\ 2,0$) aufgenommen wurde. Die Zunahme des K-Entzuges bei Erhöhung des K-Niveaus von K_0/K_{-1} auf K_1 bzw. K_2 oder K_3 ist bei pF 1,6; pF 2,0 und

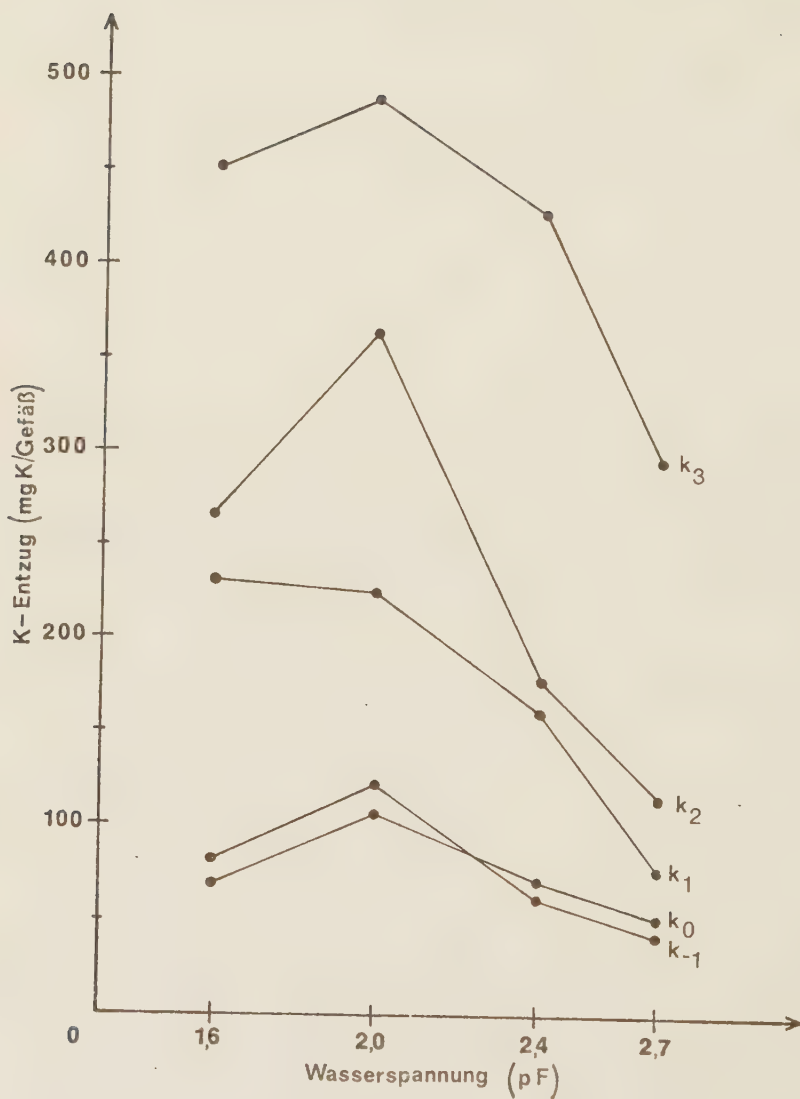


Abb. 13: Beziehung zwischen der Wasserspannung (pF) im Boden und dem K-Entzug (mg K/Gefäß) der Sprosse bei unterschiedlichem K-Niveau (k_{-1} - k_3)

pF 1,6					pF 2,0					pF 2,4					pF 2,7						
	K ₋₁	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₋₁	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₋₁	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	K ₋₁	K ₀	K ₁	K ₂	K ₃	
K ₋₁	-	0	3	3	3	0					0					0					
K ₀		-	3	3	3	0					0					0					
K ₁			-	0	3	0					1					3					
K ₂				-	3	2					1					3					
K ₃					-	0					0									3	
					K ₋₁	-	0	2	3	3	1					1					
					K ₀		-	3	3	3	0					1					
					K ₁			-	3	3	1					3					
					K ₂				-	3	3				3						
					K ₃					-	1									3	
					pF 2,4					K ₋₁	-	0	2	3	3	0					
										K ₀		-	2	3	3	0					
										K ₁			-	0	3	2					
										K ₂				-	3	2					
										K ₃					-	3					
										pF 2,7					K ₋₁	-	0	0	1	3	
															K ₀		-	0	1	3	
															K ₁			-	0	3	
															K ₂				-	3	
															K ₃					-	

0 = nicht gesichert

1 = Grenzdifferenz 5% *

2 = Grenzdifferenz 1% **

3 = Grenzdifferenz 0,1% ***

Tab.13: Statistische Sicherung der Unterschiede
z. Kassen (die Berechnung beruht auf
"u") jede Variante (jede Variante ")).

0 = nicht gesichert

1 = Grenzdifferenz 5% *

2 = Grenzdifferenz 1% **

3 = Grenzdifferenz 0,1% ***

Tab. 1.2: Statistische Sicherung der Unterschiede

zu K₋₁ (die Berechnung bezieht sich auf jede Variante der Variante "a").

pF 2,4 in den meisten Fällen von einer Düngungsstufe zur nächsthöheren hochsignifikant gesichert (Tab. 13). Bei pF 2,7 dagegen ist zwischen K_0/K_{-1} und K_1/K_2 kein signifikanter Mehrentzug zu verzeichnen, erst ein Anheben des K-Niveaus auf K_3 erbrachte eine signifikante Zunahme des K-Entzuges.

Die K-Aufnahme beträgt in der Variante K_2 /pF 2,7 das Doppelte, in der K_3 /pF 2,7 Variante sogar das 6-fache von Variante K_0 /pF 2,7. Bei pF 2,0 liegen die Relationen zwischen den Varianten K_0 und K_3 ähnlich. Hier ist die relative Mehraufnahme an Kalium bei K_3 knapp 5 mal so hoch wie bei K_0 . Insgesamt gesehen gibt dieses Bild des K-Entzuges, wie es sich in Abb. 13 präsentiert, eine eindeutige Aussage über die Bedeutung der Bodenfeuchte für die effektive K-Verfügbarkeit. Sie wird mit zunehmender Wasserspannung im Boden beachtlich reduziert, und die ersten beiden Düngungsstufen (K_1 und K_2) konnten in der trockensten Variante (pF 2,7) den K-Entzug nicht allzu sehr erhöhen. Erst in der höchsten K-Düngungsstufe mit einem Gehalt an austauschbarem K von 46 mg/100 g Boden konnte die durch Trockenheit gehemmte K-Anlieferung weitgehend überwunden werden. Dementsprechend ist hier auch ein erheblicher Ertragsanstieg zu verzeichnen. Dieses Bild des K-Entzuges bestätigt, daß für die Ertragsvarianz nur das K und kein anderer Nährstoff, auch nicht Wasser, verantwortlich ist; denn würde die Ertragsvarianz primär von der Wasserversorgung des Bodens herrühren, hätte die K-Düngung keine derartig hohen Mehrerträge erbringen dürfen.

Der K-Entzug ist das Produkt aus Ertrag und K-Gehalt der Trockensubstanz. Wenn zwischen dem K-Entzug und dem Ertrag eine hochsignifikante Korrelation ($r = 0,96^{***}$) gefunden wurde (Abb. 14), so bedeutet dieses, daß für den Gesamtentzug primär der Ertrag und dann erst der K-Gehalt entscheidend war.

Der K-Gehalt der Sprosse zeigt bei allen K-Düngungsstufen eine ähnliche Beziehung zum Feuchtigkeitsgrad des Bodens wie der Ertrag oder der K-Entzug (Tab. 14). Er nimmt nämlich deutlich mit geringer werdender Durchfeuchtung des Bodens ab. Mit Ausnahme von K_1 ist bei allen K-Düngungsstufen ein leichtes Ansteigen im K-Gehalt der Pflanzen bei Erhöhung der Wasserspannung von pF 1,6 auf pF 2,0 und eine Verringerung

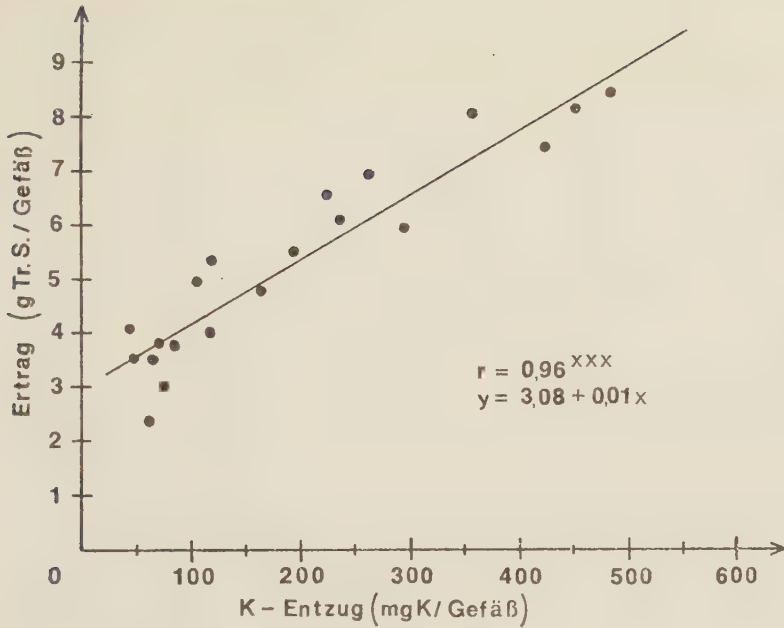


Abb.14: Beziehung zwischen dem K-Entzug (mg K/Gefäß) der Sprosse und dem Ertrag (g Tr.S./Gefäß)

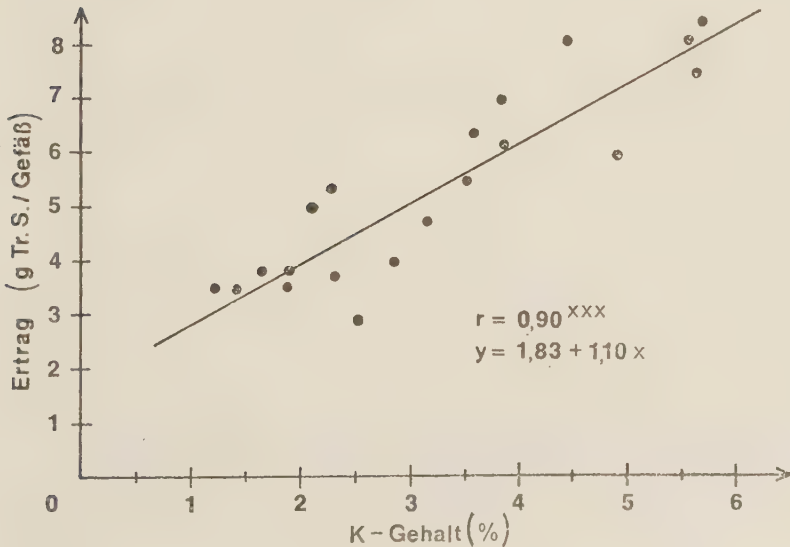


Abb.15: Beziehung zwischen dem K-Gehalt (in % der Tr.S.) der Sprosse und dem Ertrag (g Tr.S./Gefäß)

Tab.14: K-Gehalt der Sprosse (in % der TS)

pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K ₋₁	2,27	2,22	1,57	1,18
K ₀	1,86	2,09	1,87	1,38
K ₁	3,82	3,51	3,33	2,51
K ₂	3,80	4,42	3,50	2,82
K ₃	5,58	5,67	5,60	4,89

des K-Gehaltes im Sproß bei einer Wasserspannung von pF 2,4 bzw. pF 2,7 festzustellen.

In den jeweiligen K-Düngungsstufen liegt der K-Gehalt bei pF 2,7 am niedrigsten. Bei den Varianten K₀/K₋₁ ist der K-Gehalt mit 1,2% bis 2,3% (Tab.14) für junges Pflanzenmaterial recht niedrig, aber nur bei pF 2,7 traten zeitweilig K-Mangelsymptome auf. Bei den anderen Varianten dieser Düngungsstufen herrschte latenter, aber nicht sichtbarer K-Mangel.

Bei den Varianten K₁ und K₂ sind die K-Gehalte mit 2,5% bis 4,4% im normalen Bereich. Die Pflanzen sind ausreichend bis gut mit K versorgt. Die Pflanzen der K₃ - Varianten weisen K-Gehalte von 4,9 - 5,7% auf, was einer guten K-Versorgung entspricht. Auffällig ist die starke Zunahme im K-Gehalt der TS bei Erhöhung des K-Niveaus im Boden von K₂ auf K₃. Sie macht deutlich, daß Höchsterträge nur bei beachtlich hohem K-Gehalt in der Pflanze erzielt werden.

Zwischen dem Ertrag und dem K-Gehalt der oberirdischen Pflanzenmasse wurde eine recht gute Beziehung von $r = 0,90^{***}$ gefunden (Abb.15). Der Befund, daß die Kurve linear verläuft, bedeutet, daß der mögliche Höchstertrag noch nicht erreicht wurde. Denn die Beziehung Ertrag / K-Gehalt der Pflanze entspricht einer Sättigungskurve. Bei dem hier vorliegenden Ergebnis wurde der Wendepunkt der Kurve noch nicht erreicht.

2. Ertragsbildung sowie Kaliumaufnahme und Kaliumgehalt der Wurzeln

Eine klare Abhängigkeit des Wurzelwachstums von der Durchfeuchtung

des Bodens ist nicht gegeben, da sich die einzelnen K-Düngungsvarianten recht unterschiedlich bei verschieden hoher Wasserspannung des Bodens verhalten (Abb.16). Bei den Varianten K_0 sinkt die Wurzelmenge z.B. mit zunehmender Wasserspannung von pF 1,6 auf pF 2,4 um 75%, steigt dann bei pF 2,7 aber wieder um das Doppelte des Ertrages bei pF 2,4 an. Völlig gegensätzlich dazu verhalten sich die K_3 - Varianten, wo zunächst ein geringer Abfall der Wurzelmasse bei steigender Wasserspannung von pF 1,6 auf pF 2,0 zu verzeichnen ist, dann aber ein kontinuierliches Ansteigen im Kurvenverlauf erkennbar wird. Bei den Varianten K_1 und K_2 fällt der Ertrag an Wurzelmasse zwischen pF 1,6 und pF 2,0, steigt bei pF 2,4 wieder an und geht bei pF 2,7 bis zum Minimum zurück. Bei allen K-Varianten, mit Ausnahme der Variante K_{-1} , ist der Wurzelertrag bei pF 1,6 am höchsten. Nur bei den K_{-1} - Varianten verläuft die Wurzelertragskurve so wie bei den Erträgen der Sprosse (Abb.12). Diese Variante zeigt in allen Feuchtigkeitsstufen im Vergleich zur K_0 -Variante keinen geringeren Ertrag. Da sich die Wurzelmasse nur bei zwei Varianten mit zunehmender Trockenheit verringerte, die anderen Versuchsglieder sich aber eher gegenläufig verhalten, kann nicht gefolgert werden, daß das Wurzelwachstum eindeutig von der Wasser- und K-Versorgung bei den hier vorliegenden Ergebnissen unter den gegebenen Versuchsbedingungen beeinflusst wurde.

Bei der Diskussion der Wurzelerträge bleibt zu berücksichtigen, daß die Wurzeln einer Variante in jeweils 2 verschiedenen Medien heranwuchsen, nämlich im Bodenmedium und im Nährlösungsmedium (Quarzsand). Bei getrennter Betrachtung der Wurzelmasse im Bodenmedium (Abb.17) und in dem Nährlösungsmedium (Abb.18) zeigt sich, daß die Kurven der Wurzelerträge beider Nährmedien in recht unterschiedlicher Weise verlaufen. Die Werte der Wurzelmasse im Bodenmedium zeigen ungefähr das gleiche Bild wie die Kurven der Gesamtwurzelerträge (Abb.16). Eine eindeutige Abhängigkeit zum Wassergehalt ist nicht gegeben. Ebenso wenig hatte das K-Niveau im Boden einen klaren Einfluß auf die Wurzelmenge. Mit Ausnahme von den Varianten bei K_0 , bei denen die Wurzelmasse stark schwankt, unterscheiden sich die Wurzelerträge innerhalb der jeweiligen Düngungsstufen nicht allzusehr. Im äußersten Fall beträgt das Minimum des Wurzelertrages 50% vom Maximum. Bei den oberirdischen Pflanzenteilen wurden weit höhere Ertragsunterschiede gemessen. Abb.18 zeigt sie im

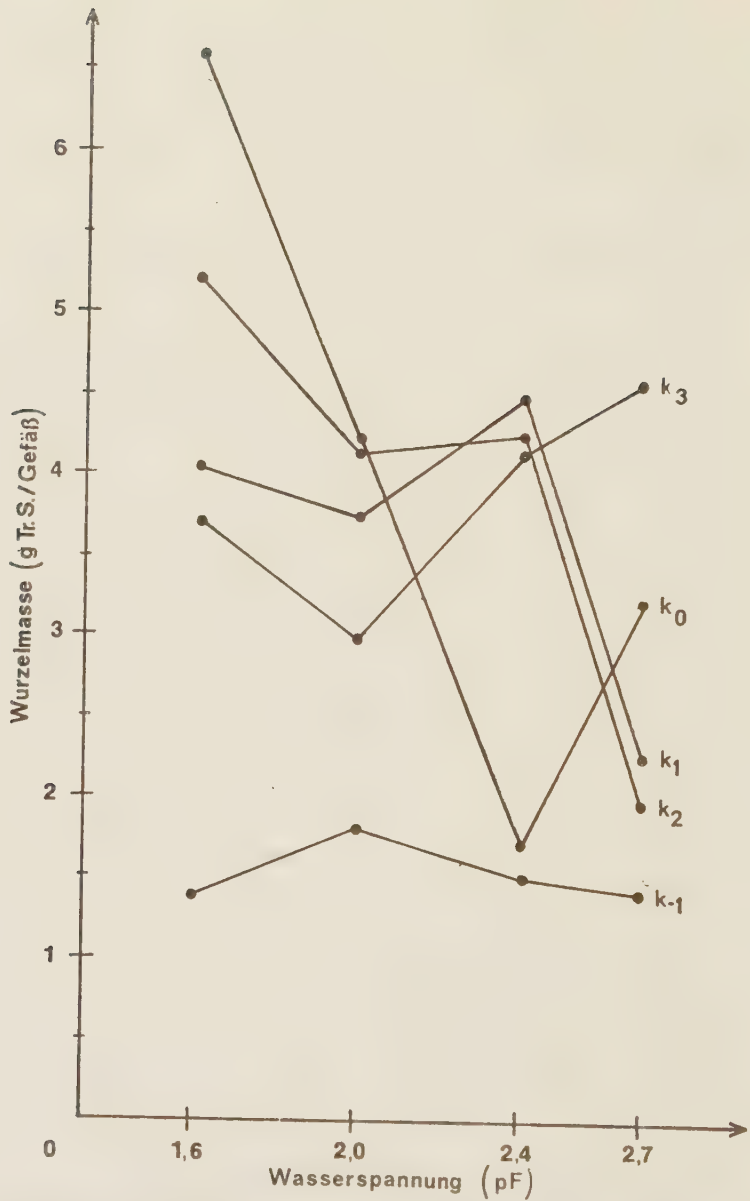


Abb.16: Ertragsbildung der Gesamt-Wurzelmasse (g Tr.S./Gefäß) (Wurzeln im Bodenmedium + Nährmedium) in Abhängigkeit von der Wasserspannung (pF) im Bodenmedium bei unterschiedlichem K-Niveau (K_{-1} - K_3)

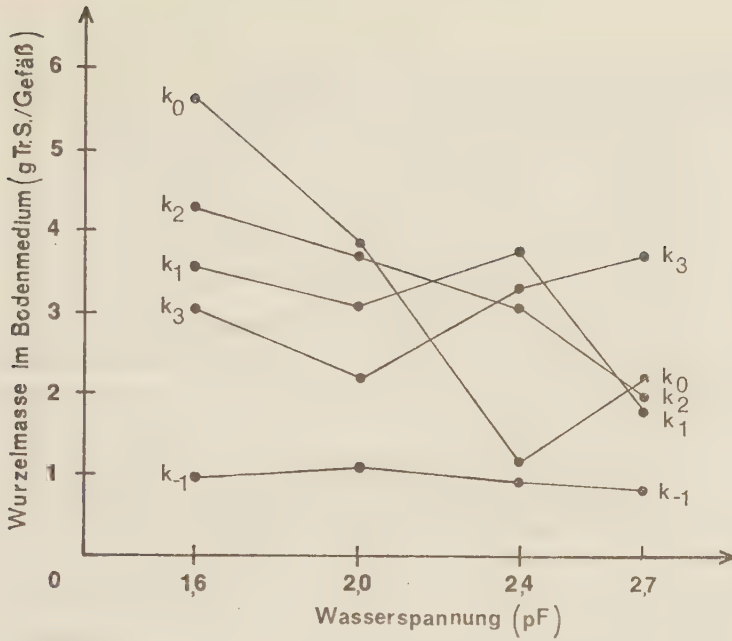


Abb. 17

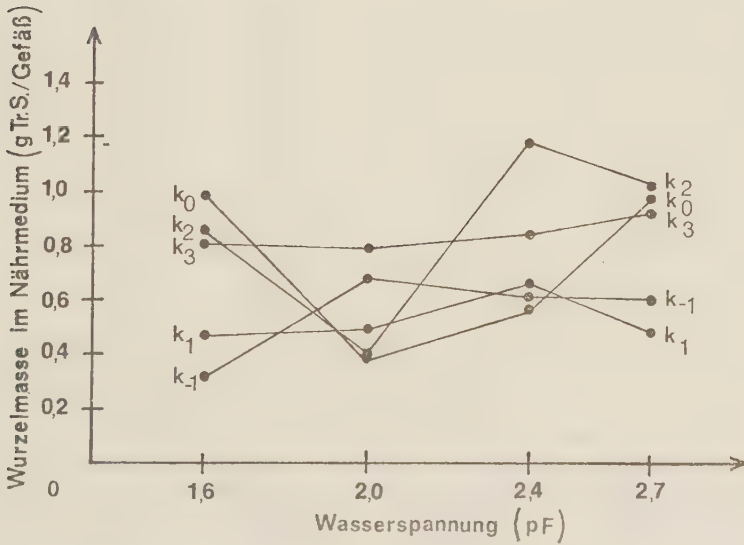


Abb. 18

17 und 18: Ertragsbildung der Wurzelmasse (g Tr.S./Gefäß) im Bodenmedium (Abb. 17) und im Nährmedium (Abb. 18) in Abhängigkeit von der Wasserspannung (pF) im Bodenmedium bei unterschiedlichen K-Niveaus (K_1 - K_3).

Nährlösungsmedium herangewachsenen Wurzelmengen. Die Varianz ist nicht so groß wie bei den Wurzeln des Bodenmediums. Das gilt besonders für die am besten mit K versorgte Variante (K_3). Eine eindeutige Abhängigkeit des Wurzelwachstums von der K-Versorgung ist jedoch nicht gegeben. Interessanterweise wurden in der Variante mit optimaler Durchfeuchtung (pF 2,0) in den meisten Fällen die geringsten im Nährlösungsmedium gewachsenen Wurzelmengen gefunden.

In Tab.15 sind sowohl die Gesamtmengen der Wurzelserträge pro Variante als auch die Werte getrennt nach Boden- und Nährlösungsmedium und deren Verhältnisse aufgeführt.

Tab.15: Ertrag an Wurzelmasse (g TS Gefäß); Gesamt-Wurzelmasse (G), getrennt nach Bodenmedium (B) und Nährmedium (N) sowie das Verhältnis Wurzelmasse im Bodenmedium zur Wurzelmasse im Nährmedium (B/N).

K	pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
		B/N		B/N		B/N		B/N	
K_{-1}	B	1,027		1,166		0,877		0,839	
	N	0,329	3/1	0,671	2/1	0,672	1/1	0,614	1/1
	G	1,356		1,837		1,504		1,453	
K_0	B	5,604		3,813		1,102		2,238	
	N	1,000	5/1	0,395	10/1	0,591	2/1	0,969	2/1
	G	6,604		4,208		1,693		3,207	
K_1	B	3,585		3,196		3,785		1,749	
	N	0,477	8/1	0,496	7/1	0,649	7/1	0,481	4/1
	G	4,062		3,692		4,434		2,230	
K_2	B	4,328		3,739		3,050		1,911	
	N	0,848	5/1	0,393	10/1	1,173	3/1	1,025	2/1
	G	5,176		4,132		4,223		2,936	
	B	3,038		2,150		3,302		3,697	
	N	0,830	4/1	0,800	3/1	0,855	4/1	0,955	4/1
	G	3,868		2,950		4,157		4,652	

Hieraus folgt, daß auch das Verhältnis Wurzelmasse im Bodenmedium zu

Wurzelmasse im Nährmedium recht unterschiedlich ist. Es schwankt von 10/1 bis 1/1. Am größten sind die Schwankungen bei pF 2,0 mit 10/1 bis 3/1, am niedrigsten bei pF 2,7 mit 4/1 bis 2/1, schließt man die K_{-1} -Varianten einmal aus, denn hier scheint das Wurzelwachstum im Boden in irgendeiner Form behindert zu sein, was jedoch nicht auf die Feuchtigkeitsverhältnisse zurückzuführen ist.

Eindeutig festgestellt werden kann, daß das Wachstum der oberirdischen Pflanzenteile im gewissen Bereich nicht von der Wurzelmenge abhängig ist. Als Beispiel dazu können die Düngungsvarianten K_0 und K_{-1} herangezogen werden. Die Erträge der Sprosse sind in den entsprechenden Feuchtigkeitsstufen etwa gleich hoch, das Wurzelwachstum ist jedoch bei der K_0 - Variante z.T. 4 - 5 mal höher als bei der K_{-1} - Variante. Auch bei einem Vergleich der Feuchtigkeitsvarianten pF 2,0 und pF 2,4 stellt man fest, daß die Wurzelerträge in allen Düngungsvarianten ungefähr gleich sind, bei pF 2,4 liegen sie sogar etwas höher, die Erträge der oberirdischen Pflanzenteile sind aber bei pF 2,4 deutlich niedriger als bei pF 2,0.

Bei der Beurteilung der Wurzelerträge sowie der Mineralstoffgehalte der Wurzeln muß jedoch auf einen Punkt hingewiesen werden. Die Wurzeln mußten mit H_2O aus dem Bodenmedium ausgewaschen werden. Dabei kann man nicht alle feinen Wurzeln und Wurzelspitzen erfassen, so daß notgedrungen die Werte für die Wurzelmengen im Boden eine gewisse Ungenauigkeit aufweisen. Weiterhin ist das Wurzelgewicht kein Maßstab für die Wurzeloberfläche, die tatsächlich zur Wasser- und Nährstoffaufnahme befähigt ist (CLARKSON 1968). Im Aussehen unterschieden sich die im Boden gewachsenen Wurzeln von denen des Nährlösungsmediums. Letztere waren wenig verzweigt und bestanden aus hellen dicken Fasern, wie sie auch sonst in Wasserkulturen gefunden werden. Die Wurzeln im Boden dagegen waren reichlich verzweigt und hatten viele kleine Nebenwurzeln, die eine größere mechanische Festigkeit aufwiesen.

Zu bemerken ist noch, daß sich der größte Teil der im Boden gewachsenen Wurzeln nicht um die eingelagerten Tonröhren befand, sondern hauptsächlich am Grunde des Gefäßes, so wie es auch bei anderen Gefäßkulturen der Fall ist.

Der K-Entzug der Wurzeln des Bodenmediums (Tab.16) zeigt ein klareres Bild als die Wurzelmassenerträge. Im Trend läßt sich feststellen, daß

Tab.16: K-Entzug der Wurzeln im Bodenmedium (mg K/Gefäß)

K \ pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K ₋₁	6,52	3,98	2,04	2,09
K ₀	7,49	11,60	9,92	11,98
K ₁	55,04	39,24	38,79	17,96
K ₂	80,77	43,10	55,29	31,98
K ₃	66,26	45,37	61,35	58,30

der K-Entzug mit steigender Wasserspannung im Boden abnimmt, jedoch nicht zwischen pF 2,0 und pF 2,4, wo er z.T. sogar noch etwas ansteigt. Die Werte bei pF 1,6 liegen bei den Düngungsvarianten K₁/K₂ etwa doppelt so hoch wie bei pF 2,7. Die Varianten K₀ und K₋₁, die kaum eine Reaktion in der K-Aufnahme auf eine Änderung des pF-Wertes zeigen, liegen deutlich niedriger als die übrigen K-Varianten.

Mit steigender K-Gabe steigt auch der K-Entzug der Wurzeln. Beachtlich ist, daß bei K₃ der K-Entzug bei pF 2,7 kaum geringer ist als bei pF 1,6.

Die Gesamt-K-Menge, die sich in den Wurzeln des Nährlösungsmediums vorfand, stammt aus dem Bodenmedium, ist also von hier über die Pflanze in das Nährlösungsmedium gewandert, denn letzteres enthielt bekanntlich kein K.

Wie Tab.17 zeigt, ist der Transport von K in die Wurzeln des Nährlösungsmediums praktisch unabhängig vom Wassergehalt des Bodens. Die transportierte K-Menge stieg aber mit zunehmendem K-Gehalt im Bodenmedium beachtlich an. Der K-Gehalt der Wurzeln im Bodenmedium zeigt eine deutliche Beziehung zum Feuchtigkeitsgrad des Bodens. Mit Ausnahme von den K₀ - Varianten sinkt bei allen K-Varianten der K-Gehalt in der Wurzel mit abnehmendem Wassergehalt im Boden. Im Gegensatz zum K-Gehalt im Sproß, wo die höchsten Werte bei einer Wasserspannung im Boden von pF 2,0

Tab.17: K-Transport in die Wurzeln des Nährmediums
(mg K/Gefäß)

K \ pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K ₋₁	1,9	4,2	2,3	2,2
K ₀	3,4	1,4	4,9	6,8
K ₁	5,7	5,9	4,9	4,1
K ₂	8,0	5,0	10,3	7,1
K ₃	14,17	12,4	14,8	7,5

liegen, haben die Wurzeln bei pF 1,6 den höchsten K-Gehalt und bei pF 2,7 den niedrigsten (Tab.18).

Tab.18: K-Gehalt der Wurzeln im Bodenmedium (B) sowie im Nährmedium (N) (in % der TS)

K \ pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
	B	N	B	N	B	N	B	N
K ₋₁	0,74	0,59	0,33	0,63	0,23	0,37	0,20	0,36
K ₀	0,20	0,30	0,30	0,37	0,64	0,83	0,52	0,70
K ₁	1,55	1,20	1,25	1,20	1,15	0,76	1,0	0,86
K ₂	1,85	0,95	0,85	0,76	1,80	0,88	1,65	0,69
K ₃	2,20	1,71	2,10	0,86	1,85	1,73	1,57	0,78

Der Abfall der K-Gehalte in den Wurzeln bei Zunahme der Wasserspannung im Boden von pF 1,6 auf pF 2,7 ist jedoch mit 0,2 - 0,4% recht gering. Auch das K-Angebot hatte einen beachtlichen Einfluß auf den K-Gehalt der Wurzeln. Mit zunehmendem K-Niveau des Bodens steigt auch der K-Gehalt in den Wurzeln. Bei den Varianten K₀ und K₋₁ liegt der K-Gehalt mit 0,2 - 0,7% am niedrigsten, bei den Varianten K₃ mit 1,7 bis 2,2% am höchsten.

Der K-Transport in die Wurzeln des Nährlösungsmediums und damit auch deren K-Gehalte waren ziemlich unabhängig von der Wasserspannung des Bodens, die K-Düngungsstufen jedoch hatten einen gewissen Einfluß (Tab.18). Mit steigender K-Düngung im Boden erhöhte sich auch der K-Gehalt in den Wurzeln der Nährlösung. Bei den Varianten K_0 und K_{-1} liegen die K-Gehalte bei 0,3 bis 0,7%, bei den K_3 - Varianten bei 0,8% bis 1,7%. Die K-Gehalte der Wurzeln in der Nährlösung erreichen 5/10 bis 9/10 der K-Werte der Wurzeln des Bodenmediums. Das Kalium wanderte also gut in diese Wurzelteile hinein, so daß sie nicht unter Kalimangel litten. Die etwas niedrigeren K-Werte in den Wurzelteilen der Nährlösung sind auch z.T. durch deren unterschiedlichen morphologischen Bau begründet. (s.S.51)

Der Vergleich der K-Gehalte in den Wurzeln (Tab.18) und in den Sprossen (Tab.14) zeigt, daß in den meisten Versuchsvarianten der K-Gehalt der Sprosse,bezogen auf TS, etwa 3 mal so hoch ist wie in den Wurzeln. Nur bei den niedrigen K-Versuchsvarianten K_0 und K_{-1} wächst das Verhältnis z.T. auf 7/1. Während bei den oberirdischen Pflanzenteilen eine gute Beziehung zwischen K-Gehalt und Ertrag gefunden wurde (Abb.15), zeigt das Wurzelwachstum im Bodenmedium als auch im Nährlösungsmedium keinerlei Abhängigkeit vom K-Gehalt.

3. Calcium-, Magnesium- und Natrium-Aufnahme und -gehalte

A) Sproß

Die Ca-Entzüge der oberirdischen Pflanzenteile sind von der Durchfeuchtung des Bodens abhängig (Tab.19).

Tab.19: Ca-Aufnahme (mg Ca/Gefäß) und Ca-Gehalte (in % d.TS) der Sprosse								
K \ pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
	mg Ca	% Ca	mg Ca	% Ca	mg Ca	% Ca	mg Ca	% Ca
K_{-1}	33,70	0,92	48,10	0,90	27,80	0,86	26,70	0,57
K_0	32,00	0,85	75,50	1,26	31,30	0,88	30,50	0,88
K_1	73,00	1,20	76,80	1,20	62,50	1,31	31,10	1,13
K_2	47,20	0,68	76,50	0,94	37,40	0,69	30,00	0,76
K_3	53,40	0,66	61,90	0,73	53,70	0,71	47,40	0,80

Bei abnehmendem Wassergehalt im Boden von pF 1,6 auf pF 2,0 erhöht sich der Ca-Entzug bei den einzelnen K-Düngungsvarianten um ungefähr das Doppelte. Bei pF 2,4 und pF 2,7 liegt der Ca-Entzug wieder auf demselben Niveau und niedriger als bei pF 1,6. Keinen eindeutigen Einfluß auf die Ca-Aufnahme hat die angebotene K-Menge. Die K_{-1} - Variante hat im Vergleich zu den anderen K-Düngungsstufen wenig Ca aufgenommen, die K_1 -Variante dagegen viel. Variante K_3 nimmt eine Mittelstellung ein.

Die Gehalte an Ca in der TS bewegen sich zwischen 0,6% und 1,2% (Tab.19). Es ist eine gewisse Tendenz zu erkennen, daß bei höherer K-Düngung die Pflanzen einen leicht erniedrigten Ca-Gehalt aufweisen. Der Einfluß der Bodenfeuchte auf den Ca-Gehalt ist recht unterschiedlich, so daß keine klare Aussage gemacht werden kann.

Die Mg-Entzüge verhalten sich in der Tendenz wie die von Ca. Bei allen K-Düngungsstufen wird bei pF 2,0 die größte Menge Mg aufgenommen (Tab.20). Sowohl bei pF 1,6 als auch bei pF 2,4 und 2,7 geht die

Tab.20: Mg-Aufnahme (mg Mg/Gefäß) und Mg-Gehalte (in % d.TS) der Sprosse

K \ pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
	mg Mg	% Mg	mg Mg	% Mg	mg Mg	% Mg	mg Mg	% Mg
K_{-1}	16,9	0,52	31,2	0,58	25,3	0,66	22,3	0,65
K_0	17,2	0,46	36,0	0,60	19,2	0,54	19,2	0,55
K_1	16,3	0,27	20,7	0,32	14,5	0,31	9,5	0,32
K_2	20,0	0,29	24,4	0,30	22,2	0,28	19,8	0,50
K_3	22,6	0,28	27,4	0,32	24,2	0,32	20,6	0,35

Aufnahme bei den Varianten K_0 und K_{-1} um die Hälfte zurück, bei den K_2 - und K_3 - Varianten schwanken die Werte nicht so stark. In der Variante K_1 liegt der Mg-Entzug bei hoher Wasserspannung recht niedrig, eine Folge des geringen Ertrages in dieser Variante. Aus Tab.20 geht eindeutig hervor, daß die Mg-Gehalte bei den niedrigen K-Düngungsstufen K_0 und K_1 mit 0,5 - 0,6% um das Doppelte höher liegen als bei den übrigen K-Düngungsstufen. Bei diesen bleibt der Mg-Gehalt mit rd.0,3% bei allen Feuchtigkeitsvarianten ziemlich konstant. Der K-Versorgungsgrad

hat also den Mg-Gehalt der Sprosse deutlich beeinflusst, ein Befund, der in der Literatur als K/Mg - Antagonismus schon häufig beschrieben wurde (FERRAR u. SLUISMANS 1955; SCHARER u. MENGEL 1958). Interessant ist jedoch, daß dieser Antagonismus im Bereich des latenten K-Mangels (K_{-1} , K_0 , K_1) deutlich hervortritt, im Bereich einer besseren K-Versorgung (Variante K_2 zu Variante K_3) mit entsprechend hohen Erträgen aber nicht mehr gegeben ist.

Ein Einfluß der Bodendurchfeuchtung auf den Na-Entzug liegt nur bei den höheren K-Düngungsstufen K_2 und K_3 vor (Tab.21). Hier sinkt die

Tab.21: Na-Aufnahme (mg Na/Gefäß) und Na-Gehalte (in % d.TS) der Sprosse

K \ pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
	mg Na	% Na	mg Na	% Na	mg Na	% Na	mg Na	% Na
K_{-1}	0,86	0,024	0,85	0,016	0,56	0,015	0,55	0,015
K_0	0,47	0,013	0,71	0,014	0,63	0,018	0,81	0,023
K_1	0,83	0,014	0,73	0,011	0,61	0,013	0,68	0,023
K_2	1,53	0,022	1,28	0,016	1,22	0,022	0,77	0,019
K_3	2,69	0,033	2,96	0,035	2,03	0,027	1,02	0,022

Na-Aufnahme mit steigendem pF-Wert im Boden. Bei den niedrigeren K-Stufen nimmt die Na-Aufnahme bei zunehmender Wasserspannung nur unwesentlich ab.

Der Na-Entzug steigt mit zunehmender K-Düngung an. Dies wird jedoch nicht durch das höhere K-Angebot, sondern durch den erhöhten Ertrag verursacht. Der Na-Entzug bei K_3 ist etwa doppelt so hoch wie bei den anderen K-Stufen. Der Na-Gehalt in der TS (Tab.21) schwankt zwischen 0,01% und 0,03% und liegt bei K_3 am höchsten und bei K_0 und K_{-1} am niedrigsten.

Ein eindeutiger Einfluß der Bodendurchfeuchtung ist auch hier nicht gegeben.

B) Wurzel

Die Wurzeln im Nährlösungs- und Bodenmedium unterscheiden sich nicht

in ihrem Ca-Gehalt (Tab.22). Dieser liegt bei 0,1% bis 0,4%. Eine

Tab.22: Ca-Gehalte (in % der TS) der Wurzeln im Bodenmedium (B) sowie im Nährmedium (N)

K \ pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
	B	N	B	N	B	N	B	N
K ₋₁	0,25	0,38	0,30	0,37	0,11	0,40	0,09	0,36
K ₀	0,10	0,17	0,14	0,31	0,29	0,19	0,34	0,21
K ₁	0,28	0,30	0,35	0,40	0,25	0,25	0,30	0,23
K ₂	0,20	0,14	0,23	0,23	0,17	0,17	0,22	0,13
K ₃	0,22	0,26	0,17	0,22	0,33	0,22	0,31	0,14

klare Abhängigkeit ist weder von der Bodendurchfeuchtung noch von der K-Düngung zu erkennen. Die Werte in den Wurzeln erreichen nur 1/3 der Ca-Gehalte in den Sprossen.

Auch für die Mg-Gehalte der Wurzeln wurden keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Wurzeln im Boden- und Nährlösungsmedium gefunden. Ein deutlicher Einfluß der Durchfeuchtung des Bodens auf den Mg-Gehalt der Wurzeln des Nährmediums und des Bodenmediums ist nicht zu erkennen. Die K-Versorgung aber hatte auf die Mg-Gehalte der Wurzeln des Nährlösungsmediums einen beträchtlichen Einfluß, und zwar nahmen die Mg-Gehalte interessanterweise mit der besseren K-Versorgung zu. Bedingt durch die gegebenen Versuchsbedingungen - K wurde nicht aus dem gleichen Medium aufgenommen wie Mg - zeigt sich hier also ein K/Mg-Synergismus, ein Befund, der in der Diskussion noch näher zu erläutern ist (Tab.23).

Die Na-Gehalte sind bei den Wurzeln des Nährlösungsmediums um ca.0,2% höher als in den Wurzeln im Bodenmedium (Tab.24). Sie erreichen hier Werte zwischen 0,2 und 0,5%. Diese Werte zeigen keine Abhängigkeit von der Bodendurchfeuchtung und sind bei niedriger K-Düngung um 0,1-0,2% höher als bei den Varianten K₂ bzw. K₃. Hier ist also bei den Wurzeln des Bodenmediums eine schwache antagonistische Beziehung zwischen K und Na zu erkennen.

Tab.23: Mg-Gehalte (in % der TS) der Wurzeln im Bodenmedium (B) sowie im Nährmedium (N)

K \ pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
	B	N	B	N	B	N	B	N
K ₋₁	0,30	0,17	0,25	0,23	0,21	0,23	0,30	0,23
K ₀	0,15	0,23	0,24	0,38	0,26	0,29	0,28	0,25
K ₁	0,22	0,23	0,23	0,26	0,23	0,24	0,21	0,26
K ₂	0,26	0,45	0,27	0,33	0,27	0,41	0,26	0,36
K ₃	0,20	0,37	0,18	0,42	0,22	0,45	0,24	0,29

Tab.24: Na-Gehalte (in % der TS) der Wurzeln im Bodenmedium (B) sowie im Nährmedium (N)

K \ pF	1,6		2,0		2,4		2,7	
	B	N	B	N	B	N	B	N
K ₋₁	0,29	0,56	0,35	0,56	0,35	0,70	0,37	0,67
K ₀	0,30	0,70	0,30	0,70	0,62	0,54	0,52	0,66
K ₁	0,35	0,52	0,42	0,57	0,37	0,50	0,45	0,57
K ₂	0,22	0,38	0,17	0,57	0,23	0,42	0,29	0,54
K ₃	0,21	0,54	0,25	0,62	0,24	0,67	0,22	0,40

Im Vergleich zu den Na-Gehalten in den Wurzeln sind die Na-Gehalte in den Sprossen um eine Zehnerpotenz niedriger.

4. Beziehungen zwischen den verschiedenen Kalium-Fraktionen im Boden und dem Kalium-Entzug der Pflanze

Die Resultate der Erträge und K-Entzüge sowie K-Gehalte der oberirdischen Pflanzenteile und der Wurzeln zeigen, daß sich nur bei den oberirdischen Pflanzenteilen klare und aussagekräftige Ergebnisse und Tendenzen ergeben. Deshalb soll im weiteren untersucht werden, inwieweit diese Ergebnisse

der Sprosse eine Antwort auf die eigentliche Frage dieser Arbeit - die K-Verfügbarkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden - geben können. Die Verfügbarkeit des Kaliums im Boden soll an der K-Menge gemessen werden, die die Pflanze unter vorgegebenen Bedingungen aufnehmen konnte. Diese Bedingungen und ihre experimentelle Ausführung wurden bereits weiter oben im Kapitel " Versuchstechnik " behandelt. Im folgenden soll geprüft werden, welche Bedeutung die verschiedenen K-Fractionen im Boden, in Verbindung mit der Bodendurchfeuchtung, für die Kaliumaufnahme und den Pflanzenertrag haben. Die Analysenwerte der verschiedenen K-Fractionen im Boden sind in Tab.2, die Diffusionswerte, ermittelt mit dem oben beschriebenen Modell, in Tab.25 aufgeführt. Die Pflanzenerträge sind aus Abb.12, die aufgenommenen K-Mengen der einzelnen Versuchsvarianten aus Abb.13 zu ersehen.

Tab.25: K-Diffusionsrate: Die Menge an K in μ mol, die in einer Woche aus einem Bodenblock ($\varnothing$ 4,5 cm) bei definierter Wasserspannung in einen Ionenaustauscher hinein diffundiert.

K \ pF	1,6	2,0	2,4	2,7
K ₋₁	42,20	39,64	34,33	26,02
K ₀	31,65	26,98	22,70	15,34
K ₁	44,44	39,64	33,89	30,05
K ₂	93,98	83,12	56,90	45,39
K ₃	140,66	135,54	131,07	99,10

In Abb.19 sind die von den oberirdischen Pflanzenteilen aufgenommenen K-Mengen gegen das mit 1 n NH₄-Acetat austauschbare K des Bodens aufgetragen. Für jeden im Versuch verwendeten pF-Wert ist eine eigene Kurve ausgezogen. Diese Beurteilung bestätigt noch einmal, daß in jeder K-Stufe bei pF 2,0 die größte und bei pF 2,7 die geringste Menge an K aufgenommen wurde.

Bei den Feuchtigkeitsstufen pF 1,6; 2,0 und 2,4 nimmt der K - Entzug bei einer Steigerung des austauschbaren K von 7 mg (K₋₁) auf 11 mg (K₀) ab. Wie im Kapitel " Versuchstechnik " schon erwähnt, wurde bei der Variante K₋₁ versucht, das K mit Hilfe von Ca-Ionen auszutauschen

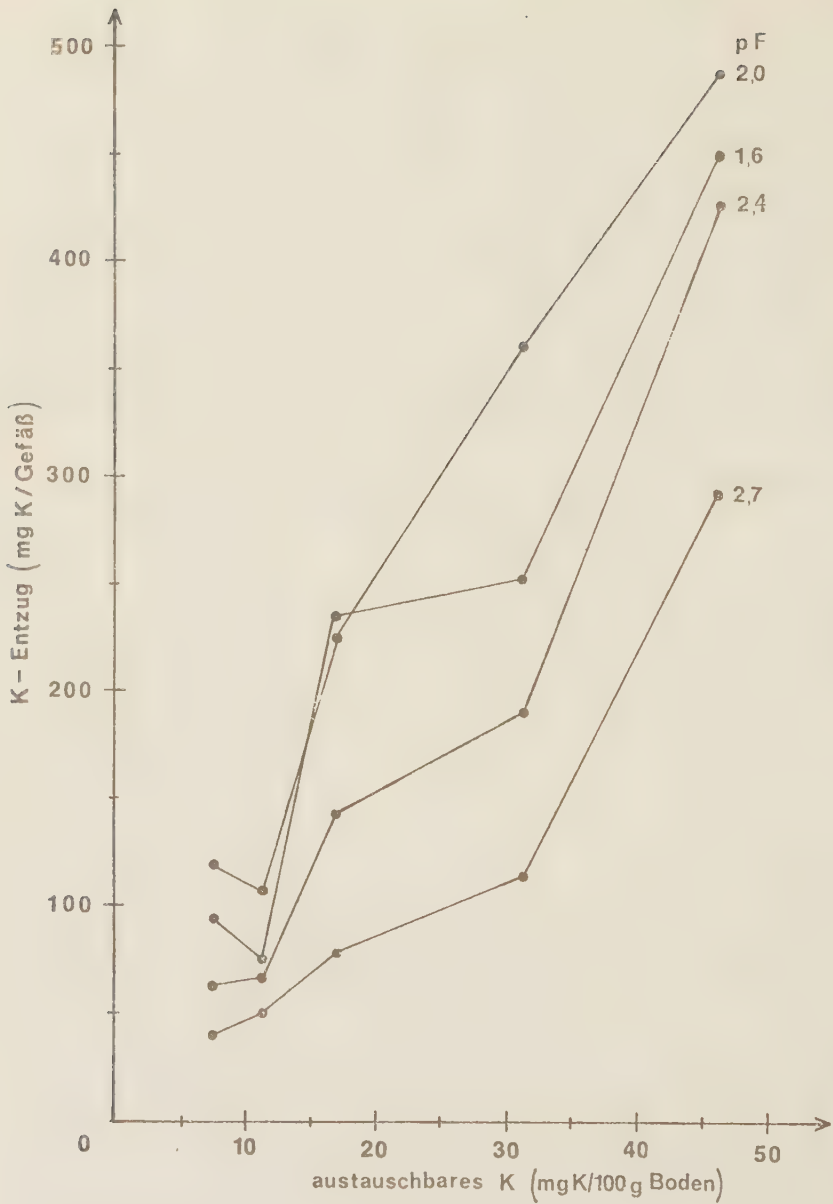


Abb.19: Beziehungen zwischen dem austauschb.K (mg K/100 g Boden) und dem K-Entzug (mg K/Gefäß) der Sprosse bei unterschiedlicher Wasserspannung (pF) im Bodenmedium.

und auszuwaschen, die Variante K_0 blieb unbehandelt. Bald nach dem Auswaschungsvorgang wurde der Boden der Versuchsvariante K_{-1} getrocknet und analysiert, wobei die in Tab.2 angegebenen Werte gefunden wurden. Wird der Boden nach einer längeren Lagerzeit wieder einige Zeit feucht gehalten und anschließend analysiert, so ergibt sich, daß die Variante K_{-1} die gleiche Menge an austauschb.K besitzt wie die Variante K_0 (11 mg K/100 g Boden). Auch während der Versuchsdurchführung war der Boden wieder ausreichend befeuchtet, so daß sich ein neues Gleichgewicht zwischen fixiertem K, austauschb.K und K-Konzentration der Bodenlösung einstellen konnte. Es wurden während dieser Feuchtigkeitsperiode wieder K-Ionen aus den Zwischenschichten mobilisiert, die in den austauschbaren Zustand oder in die Bodenlösung übergingen. Diese Tendenz zeigt sich auch bei den Diffusionsmessungen, bei denen der Boden 7 Tage befeuchtet war. Hier liegen die diffundierten K-Mengen bei der Variante K_{-1} höher als bei Variante K_0 . Hat ein Boden ein niedriges Niveau an austauschb.K wie diese Schwarzerde mit 11 mg K/100 g Boden bei Variante K_0 , so gelingt es nicht, das K-Niveau mittels Austauschen und Auswaschen mit Ca-Ionen entscheidend zu senken. Bei der K_{-1} -Variante liegt also das K-Niveau nicht niedriger als bei K_0 , es ist keine echte K_{-1} -Variante.

Mit steigendem Gehalt an austauschb.K im Bodenmedium erhöht sich der K - Entzug der Pflanze. Bei optimaler Befeuchtung (pF 2,0) deutet die K-Entzugskurve über den genannten Bereich von 11 mg austauschb.K/100 g Boden (K_0) bis 46 mg austauschb.K/100 g Boden (K_3) den Verlauf einer Sättigungskurve an. Die Zunahme im K-Entzug zwischen den Bodenwerten von 31 mg K/100 g Boden und 46 mg K/100 g Boden ist noch recht beachtlich und, wie die Varianzanalyse ergibt, hoch signifikant (Tab.13). Die Kurven für die pF-Werte 1,6 ; 2,4 und 2,7 nehmen zunächst die Form von Sättigungskurven an, die im Bereich von 17 bis 30 mg K/100 g Boden stark abflachen. In diesem Bereich ist innerhalb der einzelnen Feuchtigkeitsvarianten kaum ein Mehrentzug an K zu verzeichnen. Erst eine Erhöhung des K - Niveaus im Boden auf 46 mg austauschb.K/100 g Boden (K_3) läßt die Kurven noch einmal nach oben abknicken und steiler verlaufen, d.h.der K-Entzug steigt bei K_3 um mehr als das Doppelte von K_2 bei den verschiedenen Wassergehalten im Boden an.

Abb.19 veranschaulicht, daß für die K-Aufnahme das austauschb.K des



Abb. 20: Beziehungen zwischen der K-Konzentration im Bodensättigungs-
extrakt (mval K/l BSE) und dem K-Entzug (mg K/Gefäß) der Sprosse
bei unterschiedlicher Wasserspannung (pF) im Bodenmedium.

Bodens nicht allein maßgeblich ist, sondern daß der Bodendurchfeuchtung auch eine beachtliche Bedeutung zukommt. Bei guter Durchfeuchtung des Bodens (pF 2,0) wurde 2 - 3 mal mehr K von der Pflanze aufgenommen als bei mäßiger Durchfeuchtung (pF 2,7), bei gleichen Gehalten an austauschb. K in den einzelnen K-Varianten.

Die Beziehung zwischen K-Konzentration des Bodensättigungsextraktes (BSE) zum K-Entzug der Pflanzen (Abb.20) entspricht der Beziehung K-Entzug : austauschb.K. Da der BSE immer bei gleicher Durchfeuchtung analysiert wird, die K-Aufnahme aber bei unterschiedlichem Wassergehalt erfolgt, ist kein anderes Ergebnis zu erwarten. Eine weit bessere Aussage würde hier die tatsächliche K-Konzentration bei entsprechender Durchfeuchtung bringen. Die K-Konzentration der Bodenlösung bei unterschiedlicher Wasserspannung läßt sich aber technisch noch nicht zu -
friedenstellend bestimmen.

Im Gegensatz zur K-Konzentration der Bodenlösung kann die K-Diffusionsrate bei jedem gewünschten pF-Wert gemessen werden. Die Werte in Tab.25 geben die K-Mengen in μ val an, die in einem Zeitraum von 7 Tagen aus einer Bodenmenge (Zylinder $\varnothing$ 4,5 cm, 3 cm tier) in ein Ionenaustauscherharz bei der entsprechenden Wasserspannung hineindiffundierten. Die Tabelle macht deutlich, daß innerhalb jeder K-Düngungsstufe bei einer Wasserspannung von pF 1,6 eine größere Menge an K in den Ionenaustauscher hineindiffundierte als bei pF 2,0. Die von der Pflanze aufgenommene K-Mengen liegen jedoch bei pF 1,6 niedriger als bei pF 2,0. Die Pflanze ist bei einem sehr hohen Wassergehalt im Boden nicht in der Lage, die ihr angebotenen K-Mengen zu verwerten.

In Abb.21 sind die K-Diffusionsraten in Beziehung zum K-Entzug der oberirdischen Pflanzenteile gesetzt. Hier ergibt sich eine recht gute Korrelation von $r = 0,94^{***}$. Die Regression verläuft linear. In diese Beziehung sind alle Versuchsglieder, ungeachtet der Wasserspannung und der K-Düngungsstufe, einbezogen worden.

Der Großteil der Werte liegt im Bereich einer Diffusionsrate von 20 - 40 μ val. Es handelt sich hier im wesentlichen um die Versuchsglieder mit den höheren Wasserspannungen oder den niedrigeren K-Düngungsstufen K_{-1} bis K_1 .

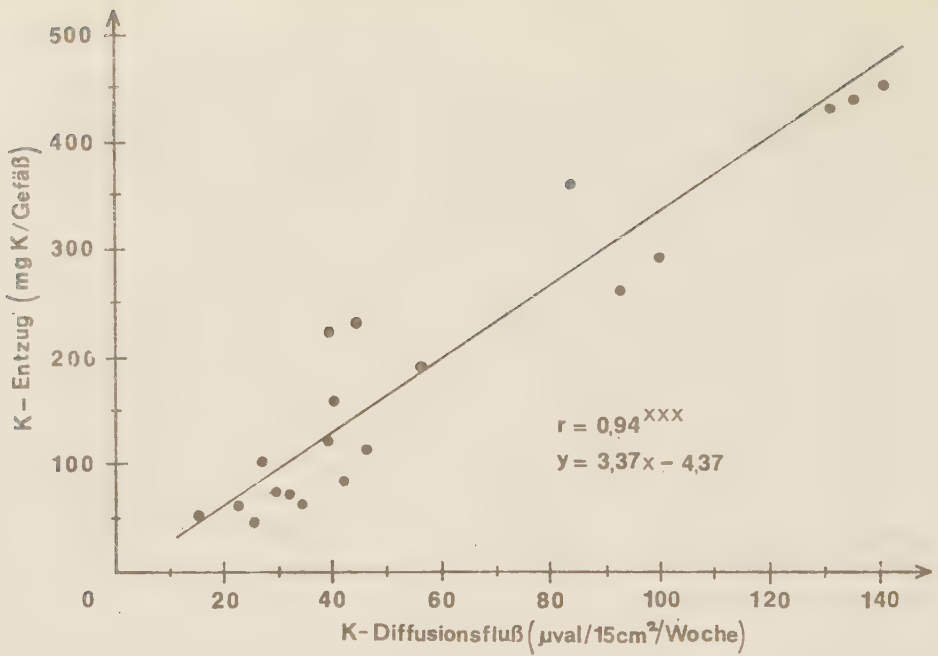


Abb. 21

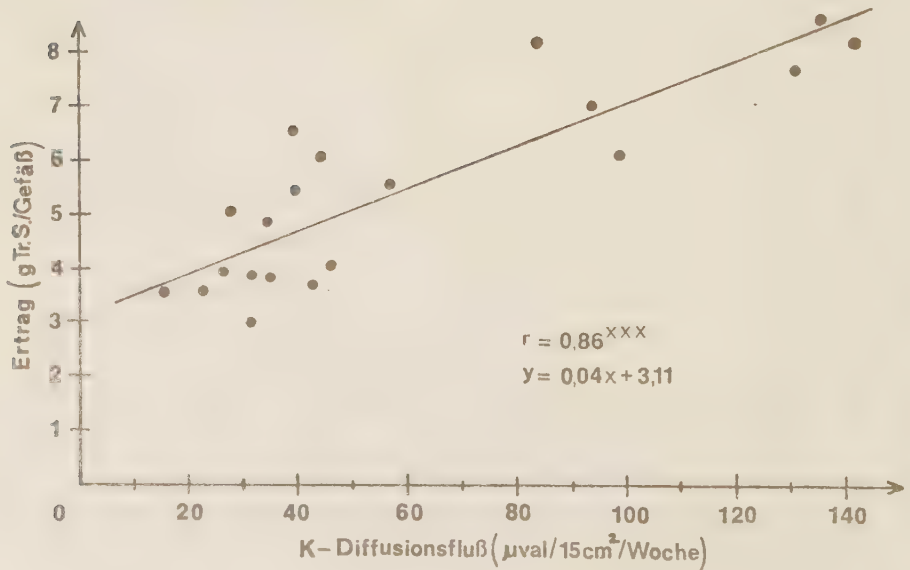


Abb. 22

Abb. 21 und 22: Beziehung zwischen dem K-Diffusionsfluß (µval K/15 cm²/Woche) und dem K-Entzug (mg K/Gefäß) (Abb. 21) bzw. Ertrag (g Tr.S./Gefäß) (Abb. 22) der Sprosse bei unterschiedlicher Wasser -

Die K-Diffusionsrate im Boden wird beeinflusst von der K-Konzentration der Bodenlösung und vom Wassergehalt des Bodens. Wird eine von beiden Variablen zum begrenzenden Faktor, dann verringert sich die Menge an K, die per Diffusion zur Pflanze herangetragen wird und, wie Abb 21 zeigt, auch die durch die Pflanze aufgenommene K - Menge. Bei einer Verdoppelung der K-Diffusionsrate von z.B. 20 μ val auf 40 μ val verdoppelt sich auch der K-Entzug von 60 mg auf 120 mg.

Auch bei der in diesen Versuchen verwendeten höchsten K-Stufe (K_3) verläuft diese Beziehung noch linear, und es ist nicht abzusehen, in welchem Bereich die durch Diffusion an die Pflanzenwurzeln herangetragenen K-Ionen auf die Pflanze depressiv wirken. Nicht ganz so eindeutig, aber immer noch als recht gut zu bezeichnen, ist die Korrelation zwischen K-Diffusionsrate und Pflanzenertrag (Abb.22). Diese Beziehung verläuft ebenfalls linear und hat einen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,86^{***}$.

V Gefäßversuch

- - - - -

Die oben aufgezeigten Ergebnisse wurden im Modellversuch mit einem einzigen Boden erzielt. Die Anwendung der speziellen Versuchstechnik gestattete Untersuchungen unter wohldefinierten Bedingungen. Mit der Anlage eines weiteren Versuches mit 21 verschiedenen Böden, ausgeführt als Gefäßversuch in der Vegetationshalle, sollte untersucht werden, ob die oben zitierten Ergebnisse des Modellversuches auch auf anderen Böden erzielt werden können.

Der Modellversuch zeigt einen klaren Zusammenhang zwischen K-Anlieferungsrate, bedingt durch die K-Diffusion und K-Aufnahme bzw. Ertragsbildung. Die Versuchsdauer betrug jedoch nur 21 Tage. Die Korrelation ist sehr viel enger als z.B. die zwischen K-Konzentration/K-Entzug oder austauschb. K/K-Entzug. Der Gefäßversuch mit den 21 verschiedenen Böden, wobei vor allem auf weitgestreute Tongehalte und Gehalte an laktatlösl. K geachtet wurde, lief über die gesamte Vegetationszeit und soll zeigen, inwieweit das austauschb.K, also der K-Vorrat im Boden oder die K - Anlieferung, gemessen als K-Diffusionsrate, (GRIMME 1971) einen Einfluß

auf die Ertragsbildung haben. Die Bodendurchfeuchtung wurde in diesem Versuch nicht genau konstant gehalten wie im Modell, sondern durch tägliche Wägung kontrolliert und auf 80% der max.Wasserkapazität ergänzt.

1. Versuchstechnik und Analytik

Die Auswahl der Böden erfolgte nach ihrem Tongehalt und dem Gehalt an laktatlösl.K. Die Tongehalte schwankten zwischen 1% und 46% (Tab.26),

Tab.26: pH-Werte, Gehalte an organischer Substanz und Tongehalte der Böden im Gefäßversuch

Boden Nr.	pH-Wert	org.Subst.%	Ton %
1	6,85	2,51	20,4
2	5,85	2,80	19,2
3	6,70	3,80	46,2
4	5,80	3,90	28,4
5	6,50	3,50	17,6
6	6,10	2,10	8,3
7	5,20	4,80	25,4
8	6,30	3,60	33,5
9	6,10	2,60	21,6
10	6,00	2,60	11,0
11	5,50	3,40	13,6
12	4,00	1,20	16,2
13	6,40	2,90	11,8
14	6,60	3,30	32,5
15	6,50	1,50	5,3
16	6,70	2,40	20,3
17	3,80	13,00	5,2
18	6,40	11,20	45,3
19	5,50	2,30	1,3
20	5,10	7,00	27,2
21	6,50	7,50	44,2

die Werte an laktatlösl.K zwischen 5 und 54 mg $K_2O/100$ g Boden (Tab.27) Alle Böden wurden beim Ansetzen in Ahrgefäßen (10-12 kg Boden) mit 25% groben Quarzsand vermischt, um eine gute Wasserführung zu gewährleisten. Pro Versuchsvariante (= 1 Boden) wurden 6 Parallelen angesetzt. Die Böden wurden zu Beginn auf pH-Wert, Gehalt an org.Substanz, Tongehalt (Tab.26) sowie Gehalt an laktatlösl. K_2O , austauschb. K (mit 1 n NH_4 - Acetat), Kationenkonzentration im Bodensättigungsextrakt (BSE) und K-Diffusionsrate untersucht (Tab.27). Aus der Kationenkonzentration des BSE wurde das Verhältnis $K/Ca+Mg$ (= " activity-ratio ") errechnet.

Tab.27: Gehalt an laktatlösl. K_2O , austauschb.K, K-Konzentration des BSE, K - Diffusionsrate und die Konzentrationsverhältnisse $\frac{K}{\sqrt{Ca+Mg}}$ der Böden im Gefäßversuch

Boden Nr.	laktatlösl. K_2O mg K_2O / 100 g Boden	austauschb. K mg K/100 g Boden	K-Konzen- tration d. BSE mval/l	K-Diffu- sionsrate /uval/ Woche	"activity-ratio" $K/\sqrt{Ca + Mg}$
1	54,7	58	1,3	166,2	0,96
2	52,8	62	1,2	169,9	1,26
3	51,8	82	0,37	103,6	0,91
4	51,2	63	1,6	204,6	3,66
5	41,7	51	1,2	163,0	3,03
6	38,4	45	1,0	111,9	3,28
7	31,4	40	0,52	77,4	2,74
8	26,9	43	0,19	50,8	0,55
9	25,9	24	0,47	58,5	0,45
10	21,9	25	0,72	79,4	1,84
11	20,4	30	0,66	53,9	2,46
12	19,9	23	0,15	46,4	1,70
13	18,2	25	0,076	25,7	0,30
14	17,9	28	0,17	25,0	0,34
15	16,9	18	0,72	59,3	0,37
16	10,5	9,7	0,16	22,2	0,14
17	10,0	7,1	0,65	28,8	0,54
18	5,0	6,7	0,06	11,5	0,065
19	4,0	3,0	0,23	9,2	0,29
20	1,5	5,0	0,065	11,4	0,055
21	7,9	8,0	0,038	10,7	0,089

Alle Böden erhielten zu Beginn folgende Düngung:

N: 1 g N als NH_4NO_3 beim Ansetzen
 1 g N " " nach der Bestockung
 0,5 g N " " zum Rispenschieben

P: 2 g P als $CaHPO_4$

Mg: 1 g MgO als $MgSO_4$

Mikronährstoffe:

2 mg B als H_3BO_3
 25 mg Cu als $CuSO_4 \times 5 H_2O$
 25 mg Mn als $MnSO_4 \times H_2O$
 30 mg Fe als Fe (III) - Zitrat

Kalium wurde nicht gegeben.

Als Versuchspflanze diente Hafer der Sorte " Pera-Gold ", pro Gefäß 24 Pflanzen. Nach dem Rispenschieben wurden pro Versuchsvariante 2 Gefäße geerntet. In den Böden wurde die zu diesem Zeitpunkt vorliegende K-Konzentration im BSE gemessen (Tab.28). Die gleiche

Tab.28: Abfall der K-Konzentration des BSE im Laufe der Vegetation (mmol/l)

Boden Nr.	zu Beginn	z.Zt.der Zwischen- ernte	z.Zt. der Ernte
1	1,3	0,57	0,25
2	1,2	0,51	0,20
3	0,37	0,18	0,12
4	1,6	0,52	0,30
5	1,24	0,38	0,33
6	1,0	0,50	0,36
7	0,52	0,27	0,34
8	0,19	0,12	0,12
9	0,47	0,14	0,10
10	0,72	0,18	0,14
11	0,66	0,19	0,14
12	0,15	0,07	0,07
13	0,07	0,02	0,04
14	0,17	0,09	0,05
15	0,72	0,27	0,12
16	0,16	0,10	0,05
17	0,65	0,18	0,16
18	0,06	0,02	0,016
19	0,23	0,07	0,071
20	0,06	0,02	0,037
21	0,04	0,02	0,031

Untersuchung erfolgte beim Versuchsende, im Reifestadium der Pflanzen (Tab.28). Bei den Pflanzen wurde der Ertrag sowie der K-Entzug (Tab.29) festgestellt.

2. Ergebnisse

Beziehungen zwischen den Kalium-Fractionen im Boden und dem Kalium-Entzug bzw. Ertrag der Pflanzen

Abb.23 zeigt die Beziehung zwischen dem austauschb.K des Bodens und dem Kornertrag. Die quadratische Korrelation zwischen beiden Variablen ist mit 0,78*** hochsignifikant. Im Bereich von 20-35 mg K, 100 g Boden,

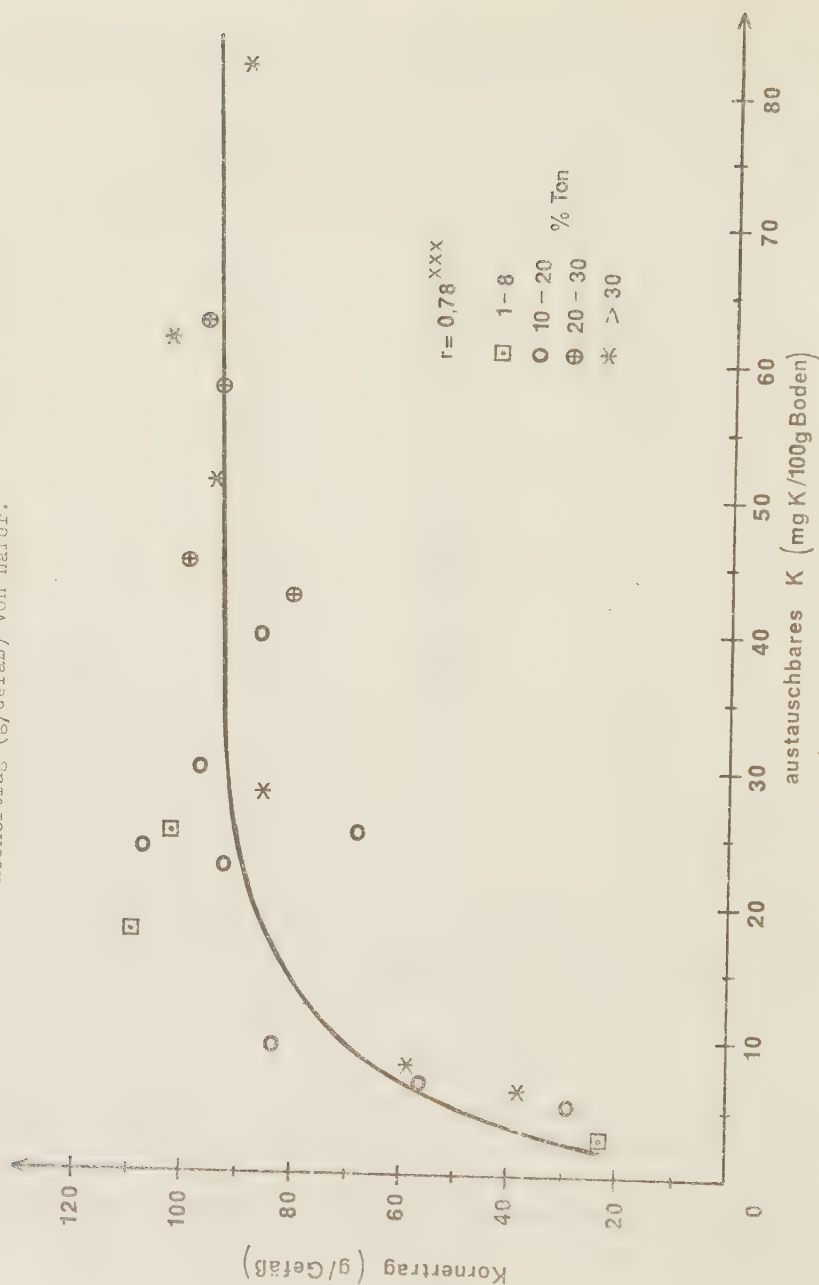
Tab.29: Ertrag an Trockensubstanz (g TS/Gefäß), getrennt nach Korn und Stroh sowie Gesamt-K-Entzug (Korn + Stroh) (g K/Gefäß)

Boden Nr.	Ertrag (g TS/Gefäß)		Gesamt-K-Entzug (g K/Gefäß) Korn + Stroh
	Stroh	Korn	
1	84,8	93,8	3,61
2	88,1	103,6	3,50
3	80,7	89,1	2,96
4	87,5	95,4	3,27
5	80,7	93,0	2,60
6	94,3	98,0	2,67
7	72,6	86,9	2,14
8	77,3	80,5	2,06
9	93,7	105,8	2,36
10	95,2	101,8	2,09
11	82,8	96,7	1,54
12	90,0	83,3	1,53
13	69,2	64,6	1,67
14	74,5	83,9	1,54
15	110,5	108,7	1,69
16	73,8	82,7	1,05
17	77,3	55,5	0,48
18	50,5	38,7	0,28
19	44,8	23,1	0,20
20	49,8	29,3	0,24
21	62,4	58,5	0,52

ein Bereich, der heute für die praktische Landwirtschaft eine große Rolle spielt, tritt jedoch eine recht große Streuung von 68-108 g im Kornertrag auf. Auffallend ist, daß die leichteren Böden Höchstserträge bereits bei K-Gehalten von 16-24 mg K/100 g Boden erbrachten, die Böden mit einem höheren Tongehalt jedoch zum Höchstsertrag ein sehr viel höheres K-Niveau im Boden von über 40 mg K benötigten.

Die lineare Beziehung $\text{austauschb.K} / \text{Gesamt-K-Entzug der Pflanzen}$ (Abb.24) ist mit 0,91^{***} recht gut. Jedoch sind die Streuungen im Bereich von 20 - 35 mg K/100 g Boden auch hier sichtbar. Im Modellversuch wurde die K-Aufnahme als Parameter für die K-Verfügbarkeit verwendet, unter der Bedingung, daß die Pflanzen optimal wachsen können und keine anderen Einflüsse auf das Wachstum einwirken. Daraus folgend konnte dann auch eine gute lineare Beziehung zwischen Ertrag und K-Entzug gefunden werden (Abb.14). Hier im Gefäßversuch verläuft die Beziehung

Abb. 23: Beziehung zwischen dem austauschb. K (mg K/100 g Boden) und dem Kornertag (g/Gefäß) von Hafer.



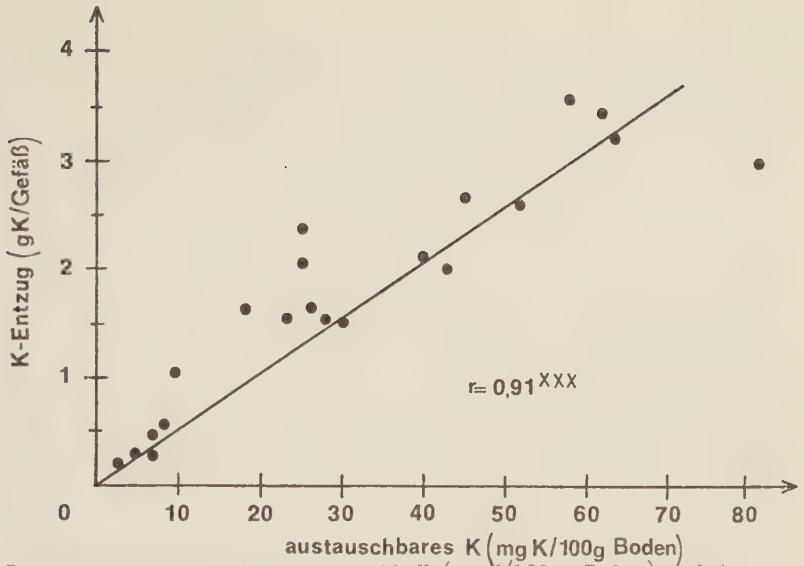


Abb.24: Beziehung zwischen dem austauschb.K (mg K/100 g Boden) und dem K-Entzug (g K/Gefäß; Korn + Stroh) von Hafer.

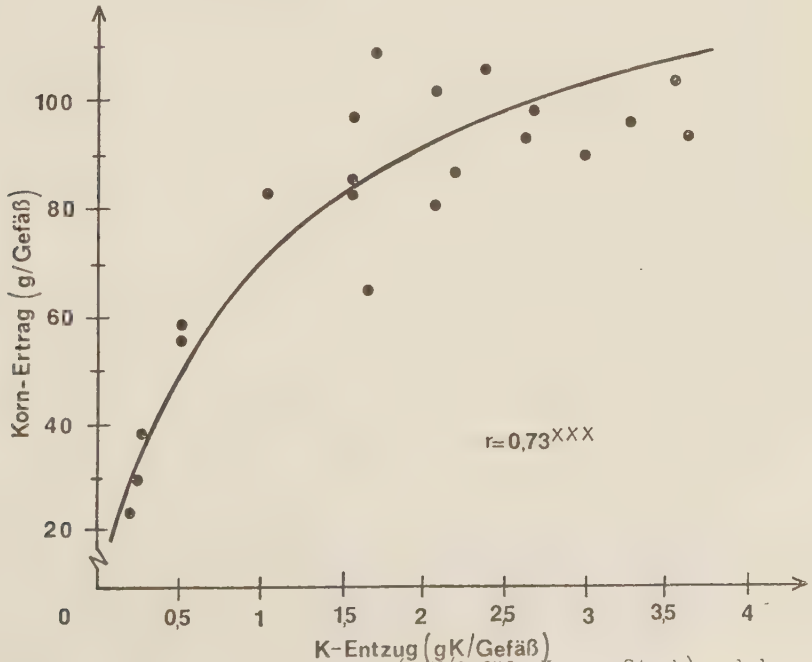


Abb.25: Beziehung zwischen dem K-Entzug (g K/Gefäß; Korn + Stroh) und dem Kornertrag (g/Gefäß) von Hafer.

austauschb.K./Ertrag in Form einer Sättigungskurve (Abb.23), die Beziehung austauschb.K/K-Entzug jedoch linear (Abb.24). Die Beziehung zwischen Ertrag und K-Entzug hat ebenfalls die Form einer Sättigungskurve (Abb.25). Diese verschiedenartigen Kurven zeigen, daß hier im Gefäßversuch, im Gegensatz zum Modellversuch, der K-Entzug nicht den allein wesentlichen Faktor für die Ertragsbildung darstellt. Ein wichtiger Unterschied zwischen dem Modellversuch mit Mais und dem Gefäßversuch mit Hafer besteht darin, daß ersterer nur die vegetative Pflanzenentwicklung umfaßt, eine Periode also, in der die Pflanzen besonders deutlich auf K ansprechen (MENGEL u.FOKSTER 1968). Der Gefäßversuch erstreckte sich aber auch über die generative Phase. Die während dieser Zeit aufgenommene K-Menge dürfte sich zwar auf die Gesamt-K-Aufnahme noch deutlich, auf die Ertragsbildung aber nur noch unwesentlich ausgewirkt haben.

Die quadratische Korrelation zwischen der K-Konzentration der Bodenlösung und dem Ertrag ist mit Ausnahme von 2 Böden mit 0,85^{***} hochsignifikant (Abb.26). Die Höchsterträge werden bei einer K-Konzentration zwischen 0,4 und 0,8 mval/l BSE erzielt. Die Streuung der Punkte um die Kurve ist geringer als bei der Beziehung austauschb.K./Ertrag. Die beiden stark abweichenden Punkte (in der Abb.als Kreuze markiert) gehören zu 2 leichten Sandböden (Boden Nr.19 mit 1% Ton und Nr.15 mit 5% Ton), deren Anfangskonzentration an K mit 0,65 bzw.0,23 mval/l BSE nicht besonders niedrig war, jedoch im Laufe der Vegetationszeit sehr abfiel. Die Konzentration am Ende des Versuches betrug bei den besagten Böden nur noch 0,16 bzw.0,071 mval/l BSE. Hier ist offenbar die K-Nachlieferung in die Bodenlösung zu gering, um den laufenden Entzug auszugleichen. Abb.2 zeigt eine Auswahl von 4 Böden mit unterschiedlichem Tongehalt und austauschbaren Gehalten an K. Die K-Konzentrationen der leichten Böden fallen im Laufe der Vegetationszeit stark ab, bei den Böden mit hohem Tongehalt ist der Abfall sehr viel geringer.

Die Beziehung K-Konzentration des BSE und K-Entzug ist mit 0,77^{***} relativ schlecht (Abb.27). Dieser Befund erklärt sich hauptsächlich damit, daß die zu Versuchsbeginn gemessene K-Konzentration der Bodenlösung, wie sie der Abb.27 zugrunde liegt, bei den einzelnen Böden in unterschiedlichem Maße während der Vegetationszeit abfällt (Abb.28).

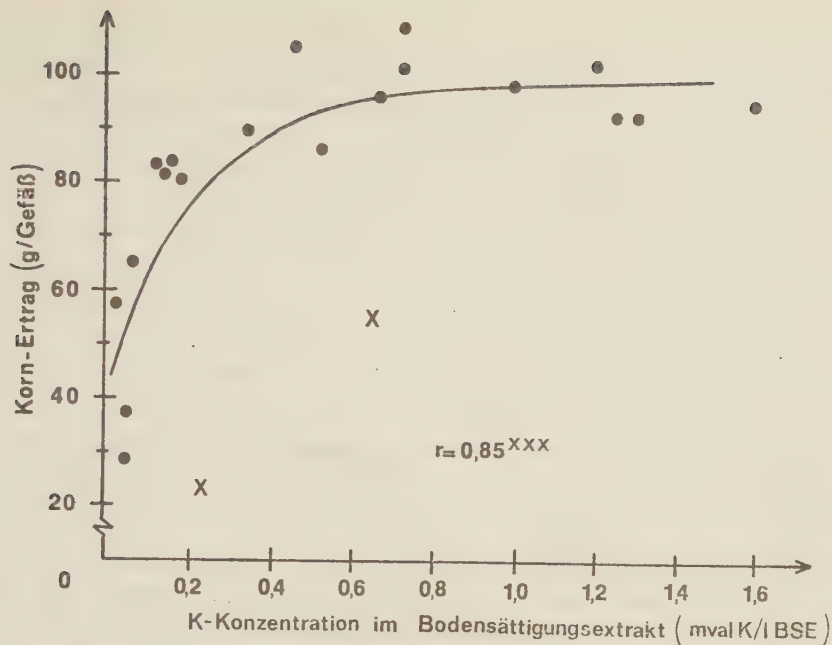


Abb.26

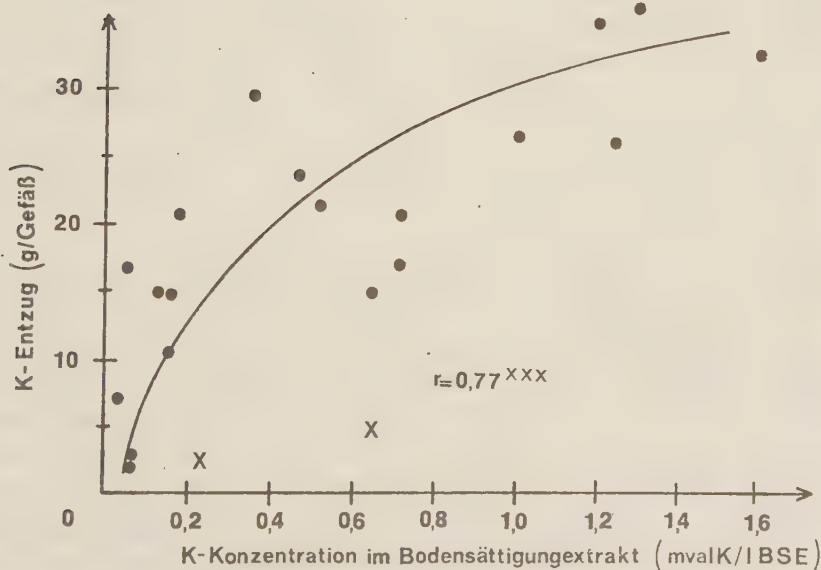


Abb.27

Abb.26 und 27: Beziehung zwischen der K-Konzentration im Bodensättigungsextrakt (mval K/l BSE) und dem Korn-ertrag (g/Gefäß) (Abb.26) bzw. K-Entzug (g K/Gefäß; Korn + Stroh) (Abb.27) von Hafer.

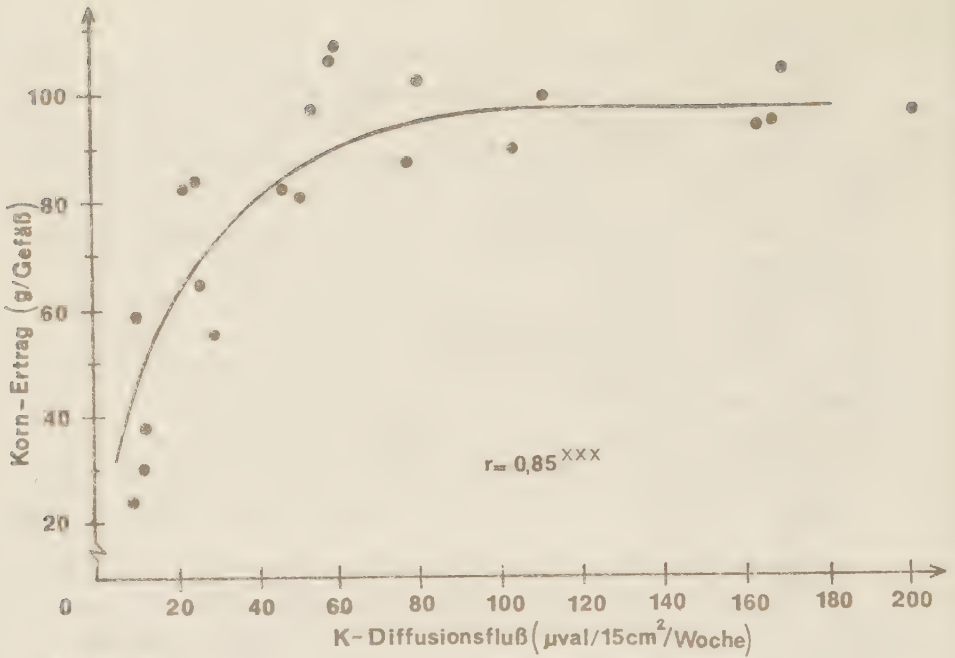


Abb. 28

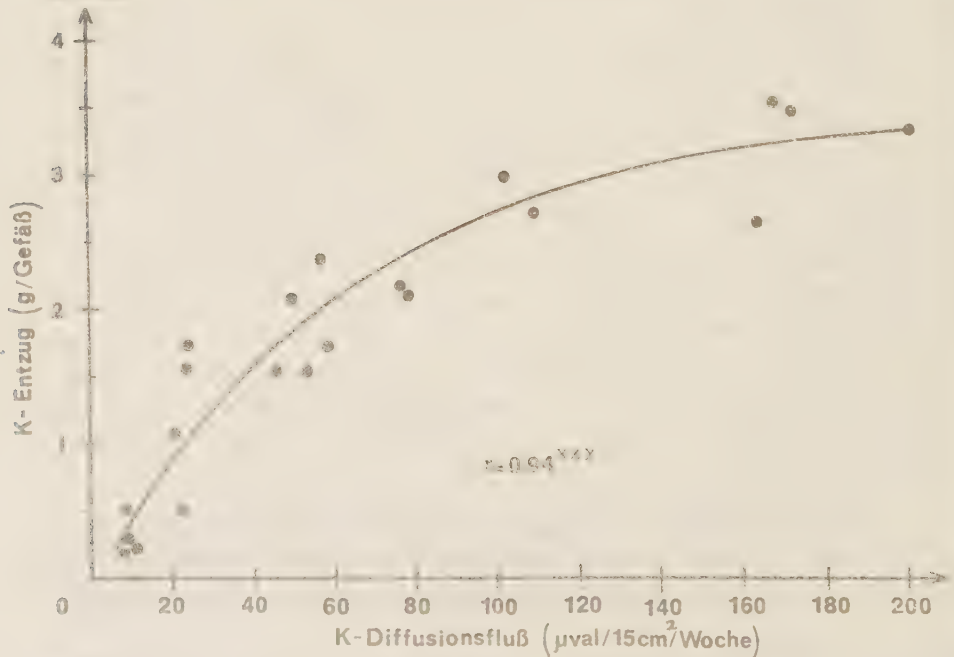


Abb. 29

und dem Kornerttrag (g/Gefäß) (Abb.28) bzw. K-Entzug (g K/Gefäß; Korn + Stroh) (Abb.29) von Hafer.

Es zeigte sich, daß dieser Abfall, besonders bei leichteren Böden, groß war. Sie puffern demnach die K-Konzentration weniger gut ab als die an Zwischenschicht-K reicheren Tonböden.

Zwischen dem Konzentrations-Verhältnis $K/\sqrt{Ca + Mg}$ im BSE ("activity - ratio") und der Ertragsbildung konnte keine gesicherte Beziehung gefunden werden. Der Befund ist deshalb besonders interessant, weil er darlegt, daß andere, den K-Zustand des Bodens charakterisierende Parameter, wie austauschb.K, K-Konzentration der Bodenlösung oder laktatlösl.K absolut der "activity ratio" in ihrer Bedeutung für die Ertragsbildung überlegen sind. Gerade dieser mit den verschiedensten Böden durchgeführte Versuch zeigt, daß das austauschb.K oder die K-Konzentration der Bodenlösung den unterschiedlichsten Bodenbedingungen noch befriedigend gerecht werden, während die von den verschiedensten Autoren propagierte "activity ratio" (WOODROFF 1955, ULRICH 1961, BECKETT 1967) versagte. Der Grund hierfür wird in der Diskussion näher erläutert.

Die quadratischen Korrelationen zwischen dem K-Diffusionsfluß und dem Ertrag mit 0,85*** (Abb.28) bzw. dem K-Entzug mit 0,94*** (Abb.29) sind hochsignifikant und eindeutig. Damit bestätigt auch dieser an 21 verschiedenen Böden durchgeführte Versuch, daß die K-Diffusionsrate und damit die Rate der K-Anlieferung an die Pflanzenwurzel der wesentliche Prozeß für die Ertragsbildung ist. Das Ergebnis deckt sich also mit den im Modellversuch an Mais ermittelten Befunden.

VI Diskussion

- - - - -

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, festzustellen, welchen Einfluß die Durchfeuchtung des Bodens auf die Pflanzenverfügbarkeit des Kaliums hat. Verfügbarkeit des Kaliums für die Pflanze ist hier als die Menge an Kalium definiert, die einer unter optimalen Bedingungen wachsenden Pflanze angeboten und von dieser auch aufgenommen werden kann. Dazu ist es notwendig, festzustellen, welche Faktoren die Pflanzenverfügbarkeit des Kaliums bestimmen und welche Rolle die Bodendurchfeuchtung dabei spielt.

Um ein optimales Wachstum der Pflanze zu gewährleisten, wurde die oben beschriebene "split-root" - Technik verwendet. Diese bietet den Vorteil, daß variierte Bedingungen in einem Teil des Nährmediums - in unserem Fall wird im Bodenmedium die Durchfeuchtung variiert - durch den anderen Teil des Nährmediums kompensiert werden und sich nicht auf den Wasserhaushalt der Pflanze auswirken. Daß diese Forderung erfüllt wurde, beweisen die erzielten Ergebnisse. Es lassen sich deshalb durch Ertrags- und K-Gehaltsmessungen der Pflanzen sowie verschiedene Bodenuntersuchungen Rückschlüsse auf die Kaliumverfügbarkeit, ihre wichtigsten Faktoren sowie den Einfluß des Wassergehaltes auf diese Faktoren überprüfen.

Der zusätzliche Gefäßversuch mit verschiedenen Böden gestattet eine Aussage darüber, inwieweit die gefundenen Ergebnisse der K-Verfügbarkeit im Modell sich auf Ertragsbildung und K-Entzug unter "normalen" Wachstumsbedingungen übertragen lassen.

Durch die Anwendung der "split-root" -Technik sind die Pflanzen ausreichend mit Wasser und den übrigen Nährstoffen (außer K) aus dem Nährmedium versorgt worden, so daß nur die K-Anlieferung aus dem Bodenmedium als variierender Faktor Ertrag und K-Aufnahme beeinflusst haben kann. In keiner Versuchsvariante unterlagen die Pflanzen einem besonderen "stress". Auch die Luft war dem Boden und damit den Wurzeln zu jeder Zeit frei zugänglich. Dies war bei der Technik, die MEDERSKI et al.(1960) anwandten, nicht der Fall. Nach Durchfeuchtung des Bodens wurde dieser in eine Wachsschicht eingeschlossen und bis zum Versuchsende so belassen. Es ist wahrscheinlich, daß dieses abgeschlossene System an O_2 verarmte, sich CO_2 anreicherte und als Folge davon reduzierende Bedingungen auftraten, die dann eine Anreicherung von toxisch wirkenden Stoffen bewirkten (GREENWOOD 1968). Diese Veränderung des Bodenmediums hat einen starken Einfluß auf den Stoffwechsel und die Nährstoffaufnahme der Pflanze. Sie wurde von MEDERSKI et al. nicht berücksichtigt.

Neben der "split-root" - Technik konnte im Bodenmedium der Wassergehalt genau kontrolliert und konstant gehalten werden (Abb.6). Alle Versuchsanordnungen anderer Autoren, die zwar mit definierten Feuchtigkeitsbedingungen arbeiten, (MOSS 1964 u.a.s.S.12) haben den Nachteil, daß sie nicht klar entscheiden können, ob die Ertragsvarianz eine

direkte Folge der K-Anlieferung oder der Wasserversorgung ist. Daneben wird mit der unterschiedlichen Bodenfeuchte auch das Angebot an anderen Nährstoffen, besonders an N, beeinflusst, was für die Ertragsbildung von Bedeutung sein dürfte. MOSS (1964) lehnt aber eine "split-root"-Technik ab, weil sie vom Pflanzenwachstum bei Feldbedingungen stark abweicht.

Bei den vorliegenden Versuchen soll die durch die Pflanze entzogene K-Menge als Parameter für die Pflanzenverfügbarkeit des K im Boden dienen. Dazu ist es notwendig, daß man die Ergebnisse der verschiedenen Varianten miteinander vergleichen kann und nicht andere negative Einflüsse das Pflanzenwachstum behindern.

Die Ergebnisse des Modellversuches bestätigen eine klare Abhängigkeit der Ertragsbildung vom K-Versorgungszustand des Bodens sowie vom Wassergehalt (Abb.12). Abgesehen von den Varianten bei pF 1,6 sinkt der Ertrag an Trockensubstanz der Sprosse mit zunehmender Wasser - spannung (= abnehmendem Wassergehalt) von pF 2,0 auf pF 2,7 im Boden ab. Da aber durch die "split-root"-Technik ein Einfluß der Wasserversorgung auf das Pflanzenwachstum vermieden wurde, kann dieser Ertragsabfall nur auf die verminderte K-Versorgung der Pflanze aufgrund schlechter Bodendurchfeuchtung zurückgeführt werden. Der Rückgang im Ertrag und in der K-Aufnahme bei pF-Werten von 1,6 ist darauf zurückzuführen, daß die Pflanzen bei dieser geringen Wasserspannung schon unter O_2 -Mangel litten. Der Versuchsboden hatte bei pF 1,6 51 Vol.% Wassergehalt (Tab.3) und nur 4% des Volumens waren mit Luft gefüllt. Bei pF 2,0 waren es schon 16 Vol.% Luft. Da sich an diesem Volumen - verhältnis während der Versuchsdauer nichts änderte, dürfte es sehr bald zu einer verminderten Aktivität der aeroben Mikroorganismen im Boden gekommen sein, die zu einer Anreicherung von toxischen Stoffen und einer verminderten Stoffwechselaktivität der Wurzel führten (GREENWOOD 1968, HARRIES u.BAVEL 1957). Auch haben HAMMOND et al. (1955) gefunden, daß bei O_2 -Mangel oder CO_2 -Anreicherung die K-Aufnahme der Pflanzenwurzel wesentlich reduziert wird. Hier ist auch der Grund zu suchen, warum bei den Versuchen von MEDERSKI et al.(1960) bereits bei Wassergehalten von über 16% eine Ertragsminderung eintrat. Bei dieser Wassermenge reichte die vorhandene O_2 -Menge im Boden dieses Versuchsmodells nicht aus, um die Aktivität der aeroben Mikroorganismen über die gesamte Vegetationszeit zu erhalten. Sinkt der

Wassergehalt unter 16%, ist der Luftvorrat für die aeroben Mikroorganismen ausreichend.

Der K-Versorgungsgrad des Bodens spielt eine wesentliche Rolle bei der Ertragsbilanz. Zwischen den Düngungsstufen K_0 und K_{-1} lassen sich keine gesicherten Ertragsunterschiede erzielen. Dies ist begründet in der Tatsache, daß das K-Niveau von K_0 dem von K_{-1} etwa gleich ist (s.S. 61). Bei guter bis ausreichender Durchfeuchtung des Bodens bei pF 2,0 und pF 2,4 sind zwischen den einzelnen K-Düngungsstufen gesicherte Ertragsunterschiede festzustellen. Bei pF 2,7 dagegen ist zwischen K_0 (11 mg austauschb. K/100 g Boden) und K_2 (31 mg austauschb. K/100 g Boden) kein gesicherter Ertragszuwachs zu verzeichnen. Erst ein K-Gehalt von 46 mg austauschb. K/100 g Boden (K_3) brachte einen signifikanten Mehrertrag (Tab.9) gegenüber den Varianten K_0 bzw. K_2 . Der K-Entzug verhält sich in gleicher Weise. Das bedeutet, daß die Pflanze bei guter Durchfeuchtung des Bodens schon bei niedrigem K-Niveau (K_0/K_{-1}) einen mittleren Ertrag bringen kann. Sinkt aber die Feuchtigkeit ab (pF 2,7), muß das K-Niveau im Boden wesentlich erhöht werden (K_3), soll noch eine gute K-Anlieferung an die Wurzeln und damit ein befriedigender Ertrag erzielt werden.

Diese Befunde werden durch die Ergebnisse von MEDERSKI et al. (1960), BROWN et al. (1963) und MOSE (1964) bestätigt. Bei MEDERSKI stimmen zwar die K-Entzugskurven mit den eigenen Untersuchungen überein, die Ertragswerte sind aber recht großen Schwankungen unterworfen, was auf die problematische Versuchstechnik der benutzten Antennen zurückzuführen sein dürfte. Offensichtlich sind hier aufgrund von O_2 -mangel bzw. durch Einwirkung toxischer Stoffe Wachstumsstörungen aufgetreten. Es lassen sich deshalb die K-Entzugswerte nur mit Vorsicht zur Interpretation heranziehen. Die Versuche wurden ungefähr bei pF-Werten zwischen pF 3,5 und pF 2,5 (Angaben nur in % Wassergehalt) durchgeführt. Hierbei nimmt der Ertrag bereits ab, wenn die Bodenfeuchte von pF 2,7 auf pF 2,5 gesteigert wurde. Das ist verwunderlich, denn im pF-Bereich von 2,5 muß mit besseren Diffusionsbedingungen und mit guten Durchlüftungsverhältnissen gerechnet werden. Dieser Befund demonstriert also den offensichtlichen Nachteil des Modells von MEDERSKI. Hier waren primär nicht die Diffusionsbedingungen, sondern die Sauerstoffzufuhr zur Wurzel ertragslimitierender Faktor.

Daß im pF-Bereich von 2,5 die Pflanzenwurzeln gut mit Luft versorgt werden, zeigt sich nicht nur bei den eigenen Versuchen, sondern auch in denen von MOSS (1964) sowie BROWN et al. (1960).

Die K-Entzugskurven in Abhängigkeit von der Wasserspannung entsprechen in ihrem Verlauf den Ertragskurven. Die Pflanzen entzogen mit steigendem Wassergehalt, mit Ausnahme zwischen pF 1,6 und pF 2,0, und steigendem K-Niveau dem Boden mehr Kalium. Daraus resultiert eine ganz klare Beziehung mit $r = 0,96^{***}$ zwischen K-Entzug und Ertragsbildung (Abb. 14). Hier ist der Beweis gegeben, daß die Varianz der Ertragsbildung bei dieser Versuchsanordnung vornehmlich eine Funktion der K-Versorgung ist. Im Gefäßversuch, in dem bereits mehr Faktoren auf die Ertragsvarianz einwirken, ist diese Beziehung nicht mehr ganz so eindeutig. Hier ist der Korrelationskoeffizient $r = 0,77^{***}$ aber ebenfalls hochsignifikant (Abb. 25).

Die Trockensubstanzgehalte steigen mit abnehmendem Wassergehalt im Boden. Dieser Befund ist aber, da die Wirkung der Bodenfeuchtigkeit auf das Wachstum eliminiert wurde, ebenfalls auf die K-Versorgung der Pflanzen zurückzuführen, denn die Trockensubstanzgehalte sinken mit zunehmender K-Aufnahme der Pflanze, also erhöhter K-Verfügbarkeit. Dementsprechend liegen die Trockensubstanzgehalte bei der K_3 -Düngungsstufe und guter Wasserversorgung am niedrigsten (Tab. 10). Der Trockensubstanzgehalt ist eine Funktion der Wachstumsintensität, die unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht vom Wassergehalt, sondern nur von der K-Versorgung der Pflanze beeinflusst wurde. Steigt die Wachstumsintensität bei guter K-Versorgung an, sinkt der Trockensubstanzgehalt und umgekehrt.

Vielfach wird heute der K-Gehalt der Pflanze als Maßstab für die K-Versorgung der Pflanze und des Düngerbedarfs des Bodens sowie für die zu erwartende Ertragsmenge herangezogen (KÖHNLEIN u. KNAUER 1959, v. BOGUSLAWSKI u. v. GIERKE 1961, STEINECK 1967, FINK 1968/1970). Die hier gemachten Angaben beziehen sich zwar nicht auf Mais, sondern in der Mehrzahl auf schossendes Getreide, aber überall läßt sich erkennen, daß mit steigendem K-Gehalt in den Pflanzen auch der Ertrag wächst. STEINECK (1967) findet in einem Gefäßversuch bei einer Steigerung des K-Gehaltes in der Pflanze von 0,04 % auf 3,14 % einen Ertragsanstieg von 100 % auf 164 %. Bei einer weiteren K-Steigerung fällt sowohl der

Gehalt als auch der Ertrag wieder ab, das Maximum der Ertragskurve ist überschritten. FINK (1970) gibt für einen durchschnittlichen Hafer- bzw. Sommergersteertrag von 35 dz/ha einen mittleren K-Gehalt von 3,4 % in schossendem Getreide an. Soll der Ertrag über 55 dz/ha steigen, so muß auch der mittlere K-Gehalt auf 4,8 % erhöht werden.

Bei den Modellversuchen wurde eine klare lineare Beziehung von $r = 0,90^{***}$ zwischen K-Gehalt und Ertrag gefunden. Da aber auch der Einfluß des K-Gehaltes auf die Ertragsbildung den allgemeinen Ertragsgesetzen unterliegt, ist anzunehmen, daß auch diese Beziehung einer Sättigungskurve entsprechen dürfte, der Wendepunkt bei knapp 6 % K in der Trockensubstanz junger Maispflanzen aber noch nicht erreicht wurde. Das besagt, daß mit einer weiteren K-Steigerung im Boden sowohl der K-Gehalt in der Pflanze noch ansteigt und damit auch noch eine weitere Ertragssteigerung zu erwarten ist. Wo der Höchstertrag unter diesen Versuchsbedingungen liegen wird, läßt sich aus den gefundenen Werten noch nicht absehen.

Bei der Beobachtung des Wachstumverlaufes der einzelnen Versuchsvarianten wurden nur bei den niedrigen K-Düngungsstufen K_0 und K_{-1} und hoher Wasserspannung von pF 2,7 Kalimangelsymptome für kurze Zeit festgestellt. Die Pflanzen dieser Varianten hatten einen K-Gehalt in den Sprossen von 1,18 % bzw. 1,38 % der Trockensubstanz. Schon bei einem K-Gehalt von mehr als 1,5 % waren keine sichtbaren K-Mangelsymptome mehr zu erkennen. Daraus läßt sich schließen, daß ein sichtbarer K-Mangel erst bei extrem niedrigen K-Gehalten auftritt, ein latenter Mangel aber immer noch vorhanden ist, auch wenn die K-Gehalte angehoben werden. Auf schlecht mit K versorgten Böden, wie die K-Düngungsstufen K_0 und K_{-1} mit 11 mg austauschbarem K/100 g Boden, treten K-Mangelsymptome an den Pflanzen erst auf, wenn die Durchfeuchtung des Bodens nicht mehr optimal ist. Eine gute Durchfeuchtung des Bodens bei pF 2,0 gibt der Pflanze die Möglichkeit, mehr K aufzunehmen und so den K-Gehalt geringfügig zu erhöhen. Dieser Tatbestand stimmt auch mit Beobachtungen überein, die GÄRTEL (1964) an der Weinrebe traf. Bei anhaltender Dürre traten K-Mangelercheinungen an den Pflanzen auf, die entweder nach einer längeren Regenperiode oder nach einer sofortigen K-Spritzung wieder verschwanden. GÄRTEL führt diese Erscheinung auf unzureichend verfügbare K-Reserven im Boden zurück. Nach den vorliegenden Untersuchungen dürften hierfür

primär weniger die K-Reserven als die behinderte Anlieferung von K an die Wurzel verantwortlich sein. Auch BAIER (1967) findet bei Zuckerrüben in trockenen Jahren K-Mangelsymptome. Die K-Aufnahme war hier im trockenen Jahr wesentlich niedriger als im feuchten Jahr, bei gleichen K-Gehalten im Boden. Feldversuche von OEHM (1966) über den Nährstoffentzug und dessen Verlauf während der Vegetation lassen ebenfalls deutlich werden, daß in dem feuchteren Jahr 1965 der Kalientzug verschiedenster landwirtschaftlicher Kulturen wesentlich höher war als in dem mehr trockenen Jahr 1964.

Das Angebot an Ca, Mg und Na war für die Pflanzen in allen Versuchsgliedern gleich. Unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt des Bodens konnten die Pflanzen ihren Bedarf an diesen Nährstoffen und an Mikronährstoffen aus dem Nährlösungsmedium decken. Da diese Nährlösung kein K enthielt, konnte auch ein evtl. Antagonismus in der Aufnahme zwischen K und anderen Nährstoffen ausgeschlossen werden. Auch die Wurzeln im Bodenmedium konnten Ca, Mg und Na aufnehmen; hier bestand jedoch die Möglichkeit der Beeinflussung durch den Feuchtigkeitsgehalt und durch die K - Gehalte im Boden.

Die Ca-Gehalte in den Wurzelteilen des Bodenmediums und des Nährmediums sind etwa gleich, ein Einfluß der Wasserversorgung des Bodenmediums oder der K-Versorgung ist nicht festzustellen. Das K-Angebot im Boden beeinflusste nur leicht den Ca-Gehalt im Sproß. Hier liegen die Ca-Gehalte der Pflanze bei niedrigem K-Niveau um 0,1 - 0,2% höher als bei hohem K-Niveau.

Die Na-Aufnahme wird durch die Abwesenheit des K in der Nährlösung leicht begünstigt, so daß die Na-Gehalte der Wurzeln im Nährmedium etwa um 0,1% höher sind als im Bodenmedium. Die Na-Gehalte der Sprosse sind um eine Zehnerpotenz niedriger als die der Wurzeln. Dieser beachtliche Unterschied zwischen dem Na-Gehalt der Wurzeln und der oberirdischen Pflanze ist gerade für Mais charakteristisch. Er kann Na nur beschränkt akropetal transportieren (HUFFAKER u. WALLACE 1959, SCHARRER u. MENGEL 1960, MARSCHNER u. SCHAFARZIK 1967). Die genannten Autoren erklären die ausgesprochene Na-Akkumulation in den Wurzeln mit der geringen Beweglichkeit von Na^+ im Symplasma bzw. der geringen Affinität des Transportsystems für Na^+ .

Die Bodendurchfeuchtung spielt für den Mg-Gehalt der Pflanze bei den vorgegebenen Versuchsbedingungen keine Rolle, wohl aber die K-Versorgung des Bodens und damit die K-Gehalte in den Pflanzen. Hier verhalten sich die Mg-Gehalte in den Sprossen (Tab.20) sowie in den Wurzeln des Nährmediums und des Bodenmediums (Tab.23) verschieden. Mit steigendem K-Versorgungsgrad des Bodens sinkt der Mg-Gehalt in den Sprossen. Dieser K/Mg - Antagonismus (FERRARI u.SLUISMANS 1955, SCHARER u.MENGEL 1958) tritt aber nur im Bereich zwischen K-Unterversorgung (K_0 und K_1) und mittlerer K-Versorgung (K_1) auf. Ein weiteres Anheben des K-Niveaus im Boden und damit in der Pflanze (K_2 und K_3) sowie einer signifikanten Ertragssteigerung hat kein weiteres Absinken des Mg-Gehaltes zur Folge.

Die Mg-Gehalte der Wurzeln im Bodenmedium - hier wurde K und Mg aus dem gleichen Medium entnommen - wurden vom K-Versorgungsgrad des Bodens nicht beeinflusst. Im Gegensatz dazu steigen die Mg-Gehalte der Wurzeln im Nährmedium mit zunehmender K-Versorgung an. Hier zeigt sich ein K/Mg-Synergismus, der durch die gegebenen Versuchsbedingungen - K und Mg wurden aus verschiedenen Medien aufgenommen - bedingt ist. Bei einer K-Unterversorgung der Pflanze, daraus folgend ein niedriger K-Gehalt der Sprosse, können die Mg-Ionen einige unspezifische Funktionen des K-Ions übernehmen. Bei genügendem Mg-Angebot nimmt die Pflanze entsprechend mehr Mg auf und transportiert es in den oberirdischen Pflanzenteil. Daraus resultiert ein erhöhter Mg-Gehalt in den Sprossen. Diese unspezifische Substitution des K durch Mg im Sproß der Maispflanzen konnte jedoch den Ertragsabfall gegenüber den gut mit K versorgten Pflanzen nicht abfangen. Mg konnte also die physiologische Funktion des K bei der Ertragsbildung, z.B. die Aktivierung bestimmter Enzyme, (EVANS u.SORGER 1966) nicht übernehmen. Diese Feststellung deckt sich mit Versuchsergebnissen von FORSTER u.MENGEL (1969). Steigt die K-Versorgung an, so wird weniger Mg zum K-Ersatz benötigt, der Mg-Gehalt der Sprosse nimmt ab. Die Pflanze wird aber noch so viel Mg-Ionen in die Sprosse transportieren wie sie zur Abdeckung der speziellen Mg-Funktionen benötigt. Auch bei sehr hoher K-Versorgung wird der Mg - Spiegel dann nicht weiter sinken, es besteht hier kein K/Mg - Antagonismus mehr.

Bei der Aufnahme von Mg in die Wurzeln des Nährmediums bestand keine Konkurrenz zur K-Aufnahme, da in diesem Medium kein K vorhanden war. Die Wurzeln wurden über die Leitbahnen aus den Wurzeln des Bodenmediums mit K versorgt. Bei schlechter K-Versorgung der Pflanze benötigte diese einen höheren Anteil an Mg in den Sprossen, daher war der Mg-Gehalt in den Wurzeln des Nährmediums niedrig. Erhöhte sich der K-Gehalt im Spross und wurde dementsprechend nicht mehr so viel Mg in den Spross transportiert, so erhöhte sich auch der Mg-Gehalt in den Wurzeln.

Die Versuchsergebnisse bestätigen, daß K-Entzug und Ertragsbildung unter den gegebenen Versuchsbedingungen eindeutig von der K-Versorgung der Pflanze abhängen. Auch die Durchfeuchtung des Bodens wirkt sich auf die Ertragsbildung nur über das unterschiedliche K-Angebot an die Pflanzenwurzel aus. Das K-Angebot aber ist eine Frage der K-Verfügbarkeit im Boden.

Als das "pflanzenverfügbare" Kalium wird heute vielfach die Menge an Kalium im Boden angesehen, die mit Ca-Laktat bzw. NH_4 - Acetat ausgetauscht werden kann. Wie aber neuere Untersuchungen von BARBER et al. (1963), BLANCHET (1965), DREW u. NYE (1969) sowie MENGEL et al. (1969) zeigen, wird als eigentliches Nährmedium der Pflanzen die Bodenlösung und als "pflanzenverfügbar" die Menge an K angesehen, die an die Wurzel herangetragen wird.

Das austauschb. K kann zwar in seiner Gesamtheit von der Pflanze aufgenommen werden, vorausgesetzt, die Pflanzenwurzel erreicht alle Tonminerale, an die die K-Ionen sorbiert sind und tritt mit diesen in "Kontaktaustausch", wie ihn JENNY u. OVERSTREET (1930) postulieren. Berechnungen nach Werten von DITTMER (1940) und GLIMMERTH (1952) über Wurzellänge und Wurzeldurchmesser ergeben aber, daß nur ein ganz geringer Teil der Tonmineraloberfläche mit der Wurzeloberfläche in Berührung kommt (Berechnung s. S. 7). Hieraus resultieren z.T. die unbefriedigenden Beziehungen, die zwischen dem laktatlöslichen K und der Ertragsbildung von verschiedenen Autoren (KÖHNLEIN u. KNAUER 1959, SCHWERDT u. JESSEN 1961, RAHMSACK u. SCHACHSCHABEL 1963, RAHMSACK u. JUNGK 1968) gefunden wurden.

Im Modellversuch wurde bei jeder Änderung der Wasserspannung im Boden eine unterschiedliche Menge an K aufgenommen, und dementsprechend änderte sich der Ertrag, obgleich in den jeweiligen K - Düngungsvarianten der Gehalt an austauschb.K gleich blieb. Die Verfügbarkeit war also nur von der Durchfeuchtung abhängig. Deshalb mußte gerade in den "trockenen" Varianten (pF 2,7) die Menge an austauschb. K drastisch von 31 mg/100 g Boden auf 46 mg erhöht werden, um noch einen mittleren Ertrag zu erzielen. Im Gefäßversuch bietet sich ein ähnliches Bild. Hier konnte zwar zwischen der Ertragsbildung auf 21 verschiedenen Böden und dem austauschb.K eine Korrelation von $r = 0,78^{***}$ gefunden werden, aber im Bereich zwischen 15 und 35 mg K/100 g Boden schwankten die Erträge sehr stark. Auch ist zu sehen, daß auf leichten Böden bereits bei einem niedrigeren Gehalt an austauschb.K (20 - 30 mg) Höchsterträge erzielt wurden, die schweren Böden aber sehr viel höhere Gehalte an austauschb.K benötigten (bis zu 80 mg), um Höchsterträge zu erbringen.

Diese Resultate legen dar, daß es nicht leicht möglich ist, starre Grenzwerte für " austauschb.K " anzugeben, bei denen Höchsterträge erzielt werden können bzw.eine Düngerwirkung nicht mehr vorhanden ist. Durch die Variation des Wassergehaltes im Boden oder andere Bodeneigenschaften wird die K-Verfügbarkeit stark beeinflusst ; das austauschb.K im Boden verändert sich kaum, wohl aber die K-Aufnahme der Pflanze und ihre Ertragsbildung. Die Ermittlung des austauschb.K kann also nicht allein als die Fraktion des " pflanzenverfügbaren " K angesehen werden.

Direkt für die Pflanze verfügbar ist das in der wässrigen Phase des Bodens (Bodenlösung) gelöste Kalium (MENDEL 1972). Daher ist die K-Konzentration der Bodenlösung von entscheidender Bedeutung für die effektive K-Verfügbarkeit und die K-Aufnahme. Da die Gewinnung einer Bodenlösung bei einer über der Feldkapazität liegenden Wasserspannung technisch noch nicht einwandfrei gelöst ist, sind in die Untersuchung nur die K-Konzentrationen des Bodensättigungsextraktes (BSE) einbezogen.Es ergeben deshalb auch die in Abb.20 aufgetragenen Werte, daß bei gleicher K-Konzentration des BSE die entzogenen K-Mengen bei unterschiedlicher Wasserspannung recht verschieden hoch sind. Der BSE wird etwa bei einer Wasserspannung zwischen pF 1,6 und 2,0 gewonnen,

diese entspricht ungefähr der Feldkapazität. Die hier vorliegende K-Konzentration der Bodenlösung stellt die Gleichgewichtslage zwischen gelöstem und sorbiertem K dar. Sie gibt somit eine Auskunft über die Intensität der K-Anlieferung an die Wurzel. Sie ist deshalb ein wichtiger Faktor der K-Verfügbarkeit.

Die K-Konzentration der Bodenlösung hängt im wesentlichen von der K-Sättigung der Tonminerale und dem Wassergehalt des Bodens ab. Wird der Bodenlösung K entzogen, dann wird aus der Fraktion des austauschb.K wieder K in die Bodenlösung nachgeliefert (MENGEL u.AKSOY 1971). Das austauschb.K bildet im Boden das Reservoir für das pflanzenverfügbare K, ist der Pflanze aber primär nicht verfügbar. Bei Feststellung der Menge an austauschb.K bleibt unberücksichtigt, welche Menge K in die Bodenlösung übergeht bzw.bei welcher K-Konzentration sich das Gleichgewicht zwischen gelöstem K^+ und austauschb. K^+ einpendelt.

Im Gefäßversuch konnte eine recht gute Korrelation zwischen der K-Konzentration des BSE und dem Ertrag ($r = 0,85^{***}$) (Abb.26) bzw.dem K-Entzug ($r = 0,77^{***}$) (Abb.27) gefunden werden. Größere Abweichungen von diesen Regressionen zeigten nur zwei Böden. Hier stellte sich heraus, daß die K-Konzentration dieser beiden Sandböden mit 0,72 bzw. 0,23 mval/l BSE zu Beginn des Versuches zwar ausreichend hoch, ihr Abfall im Laufe der Vegetation aber recht beachtlich war. Ein starkes Absinken der K-Konzentration der Bodenlösung kann, wie auch die Zahlen in Tab.27/28 zeigen, nur durch eine entsprechend hohe K-Sättigung der Tonminerale abgefangen werden. Ein Boden mit hohem Tongehalt und hoher K-Sättigung besitzt auch eine ausreichende K-Konzentration in der Bodenlösung, um Höchsterträge zu erbringen. Dieser Boden wird die K - Konzentration der Bodenlösung auch bei starkem K-Entzug gut abpuffern können (Tab.27/28,Boden Nr.1-2,3-7).Sinkt aber die K-Sättigung,dann bleibt zwar bei hohem Tongehalt die K-Konzentration im Verlaufe der Vegetationszeit ziemlich konstant, für die Erzielung von Höchsterträgen aber ist sie zu niedrig. Umgekehrt können Böden mit hoher K-Sättigung und niedrigem Tongehalt die zu Beginn herrschende K-Konzentration nicht halten, da sie nicht genügend Reserven zur Nachlieferung in die Bodenlösung haben.

Eine Beziehung zwischen dem Konzentrationsverhältnis $K/\sqrt{Ca + Mg}$ ("activity-ratio") zur K-Aufnahme oder Ertragsbildung konnte nicht

gefunden werden. Das widerspricht den Ansichten verschiedener Autoren (WOODROFF 1955, ULRICH 1961, BECKETT 1967). Der Widerspruch ist dadurch zu erklären, daß die "activity-ratio" eine Rechengröße ist. Ein Verhältnis z.B. von $1/_{10}$ oder von $3/_{1}$ kann bei jeweils hohen oder sehr niedrigen Konzentrationen errechnet werden, es läßt die absolute Konzentrationshöhe außer Betracht. Die "activity-ratio" kann bei einem einzigen Boden, in dem nur ein Faktor (in diesem Fall K) variiert wird, zu gesicherten Korrelationen zum Ertrag und K-Entzug führen. Bleibt der Nenner der "activity-ratio" weitgehend konstant, dann ist für die Veränderung des Ertrages hauptsächlich der Zähler verantwortlich. Liegen jedoch, wie in unserem Falle, Böden mit recht unterschiedlichen Ca- und Mg-Konzentrationen vor, dann ist keine gesicherte Korrelation zu erwarten. Hieraus wird deutlich, daß primär nicht die "activity-ratio", also der Quotient $K/\sqrt{Ca + Mg}$ für die K-Ernährung entscheidend ist, sondern die im Zähler stehende K-Konzentration. Eine Aussage darüber, wie hoch die K-Konzentration sein muß, um Höchstserträge zu erzielen, läßt sich anhand der vorliegenden Ergebnisse noch schwerlich machen, da die K-Konzentration im Laufe der Vegetationszeit großen Schwankungen, hervorgerufen durch den wechselnden Wassergehalt und das Abpufferungsvermögen des Bodens, unterworfen ist. Beim Gefäßversuch wurden hohe Erträge in einem K-Konzentrationsbereich von 0,6 - 1 mval/l Bodensättigungsextrakt erzielt. Im Modellversuch war mit 1 mval/l BSE die Höchstgrenze in der Ertragsbildung noch nicht erreicht, die Kurven steigen besonders bei hoher Wasserspannung noch steil an.

Nicht nur die Höhe der K-Konzentration ist für die K-Verfügbarkeit entscheidend, die in der Bodenlösung befindlichen K-Ionen müssen auch an die Pflanzenwurzel gelangen. Dieses erfolgt über Massenfluß und Diffusion (BARBER et al. 1963, OLIVER u. BARBER 1966, VAIDYANATHAN et al. 1968, MENGEL et al. 1969).

Der Massenfluß von K in der Bodenlösung konnte mit der verwendeten Apparatur nicht gemessen werden. Es ist aber einleuchtend, daß der Massenfluß erheblich vom Wassergehalt des Bodens abhängig ist; denn je mehr Wasser verfügbar ist, umso mehr wird die Pflanze transpirieren, so daß im Boden der Wasserstrom zur Wurzel größer wird. Die mit dem Wasserstrom zur Wurzel getragenen K-Mengen ergeben sich aus der Wasser-

menge, die im Laufe der Vegetation zur Wurzel strömt und aus der K-Konzentration dieses Wasserstromes (MENGEL et al.1969). Je nach Durchfeuchtung des Bodens wird die K-Konzentration der Bodenlösung stark schwanken, denn bei gleicher Menge an gelöstem K ändert sich die Konzentration mit wechselndem Wassergehalt erheblich. So fand MOSS (1964) bei pF 0 eine K-Konzentration von 0,5 mmol/l Bodenlösung, bei pF 2,7 stieg diese Konzentration auf 1,2 mmol/l. Die zur Wurzel strömende Wassermenge richtet sich im wesentlichen nach dem Wasser - verbrauch der Pflanze. Dieser läßt sich in etwa mit der transpirierten Wassermenge gleichsetzen. Nun laufen jedoch Wasserbedarf und K-Bedarf der Pflanze zeitlich in den einzelnen physiologischen Stadien der Pflanze nicht parallel. Wie MENGEL u.FORSTER (1971) zeigen konnten, nimmt die Haferpflanze den Hauptteil an Kalium bis zur Blüte auf. Die hohen Transpirationsraten liegen jedoch vielfach zeitlich später. So dürften die von BARBER et al.(1963) sowie von BLANCHET (1965) angegebenen Werte für den Anteil des Massenflusses an der K-Ernährung etwas hoch liegen, sie sind auch äußerst schwer zu erfassen. Auch in Zeiten, in denen die nährstoffreichere Ackerkrume austrocknet und die Pflanze gezwungen ist, sich Wasser aus dem nährstoffarmen Unterboden anzueignen, reicht der Massenfluß nicht aus, um den K-Bedarf der Pflanze zu decken. Andererseits kann es zu einer Erhöhung der K-Konzentration in der Nähe der Wurzeloberfläche kommen, wenn in Zeiten guter Durchfeuchtung des Bodens und hoher Transpirationsraten, wie z.B. nach der Blüte, die Pflanzenwurzel nicht alles ihr angebotene K aufnehmen kann (BARBER 1962). Die K-Anlieferung zur Pflanzenwurzel mit dem Massenfluß ist stark abhängig von der Durchfeuchtung des Bodens. Nur bei hohem Wassergehalt und guter Wasserbewegung (niedriger Wasserspannung) wird ein hoher Anteil des K-Bedarfs der Pflanze durch den Massenfluß abgedeckt werden können.

Nach Ansicht mehrerer Autoren kommt der Diffusion von K die größere Bedeutung für die K-Ernährung der Pflanze zu (BARBER et al.1963, GRAHAM-BRYCE 1967, VAIDYANATHAN et al.1968, MENGEL et al.1969, DREW u.NYE, 1969, v.BRAUNSCHWEIG u. MENGEL 1971, GRIMME et al.1971). OLIVER u.BARBER (1968) geben an, daß die Diffusion mit 87-95% an der K-Ernährung bei Soja - bohnen beteiligt ist. Diese Meinung kann durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden. Sowohl im Gefäßversuch als auch im Modellversuch konnten hochsignifikante Korrelationen zwischen der K-Diffusionsrate

und dem Ertrag bzw. der K-Aufnahme gefunden werden. Die Beziehungen zwischen K-Diffusionsfluß und K-Aufnahme mit $r = 0,94^{***}$ bzw. mit $r = 0,85^{***}$ zum Ertrag sind im Gefäßversuch und im Modellversuch sehr viel enger als die Beziehungen austauschb. K oder K-Konzentration des BSE zum Ertrag bzw. zur K-Aufnahme.

Die theoretischen Grundlagen der Diffusion von Ionen im Bodenmedium wurden von verschiedenen Autoren bearbeitet (BARBER et al. 1963, GRAMM-BRYCE 1967, DREW et al. 1969, GRIMME et al. 1971 u.a.) und können hier übernommen werden. Bei allen Autoren wird deutlich, daß die K-Diffusion im wesentlichen von den Faktoren Bodentyp, Tongehalt, K-Sättigung, Temperatur, Bodendichte, K-Konzentration der Bodenlösung und der Durchfeuchtung des Bodens beeinflusst wird.

Nach GRAHAM-BRYCE (1967) kommt der Durchfeuchtung des Bodens die größte Bedeutung für die Diffusion zu. So findet er, daß der Diffusionskoeffizient bei 23% Feuchtigkeit im Boden mit $1 \times 10^{-7}/\text{cm}^2$ doppelt so groß ist wie bei 10% Feuchtigkeit mit $5 \times 10^{-8}/\text{cm}^2$. Diese Bedeutung des Wassers im Boden für die Diffusion wird von den anderen Autoren bestätigt. GRIMME et al. (1971) haben im Modellversuch (s. S. 30) die durch Diffusion verursachte K-Verarmung des Bodens im Abstand vom Ionenaustauscher in Abhängigkeit von der Durchfeuchtung des Bodens untersucht und fanden, daß bei pF 1,8 die Verarmung stärker ist als bei pF 3,2. Auch die Diffusionswege der K-Ionen (noch meßbare K-Verarmung im Abstand vom Ionenaustauscher) sind bei pF 1,8 ca. doppelt so lang wie bei pF 3,2. Bei den eigenen Untersuchungen wurden die Mengen an K gemessen, die unter definierten Bedingungen aus dem Boden in den Ionenaustauscher hineindiffundierten. Tab. 25 macht deutlich, daß für alle K-Düngungsstufen bei pF 1,6 die größte, bei pF 2,7 die geringste K-Diffusionsrate gemessen wurde. Die K-Diffusion wird also beachtlich von der Durchfeuchtung beeinflusst.

Der zweite wesentliche Faktor für die K-Diffusionsrate ist die K-Konzentration der Bodenlösung. Wie GRIMME et al. (1971) zeigen konnten, steigt die K-Diffusionsrate mit der Erhöhung der K-Konzentration an. Es wurde eine lineare Beziehung zwischen K-Diffusionsrate und der K-Konzentration im BSE gefunden. Zu beachten ist aber, daß sich die K-Diffusionsrate nicht erhöht, wenn der Anstieg der K-Konzentration der Bodenlösung auf eine Verminderung des Wassergehaltes zurückzuführen ist. In diesem Fall wirken die beiden Faktoren gegensätzlich auf den K-Diffusionsfluß ein,

da dann sehr viel schlechtere Diffusionsbedingungen herrschen. Dieser Umstand führt auch dazu, daß man den K-Diffusionsfluß nur mit Einschränkung als Bodenuntersuchungsmethode für eine Voraus - sage auf Ertragsbildung und K-Düngewirkung in der Praxis benutzen kann. Die K-Konzentration und auch der K-Diffusionsfluß lassen sich zu Beginn der Vegetationszeit bestimmen, nicht aber der Zustand der Durchfeuchtung und die Veränderung der K-Konzentration in der gesamten Vegetationsperiode.

Auch die Pflanzenwurzel hat auf die K-Diffusionsrate einen wesentlichen Einfluß. Durch die K-Aufnahme der Pflanze fällt die K-Konzentration in der direkten Umgebung der Wurzeln ab. Dadurch entsteht ein "sink" - die Diffusion wird angeregt und bleibt so lange erhalten wie die Pflanze K aus der Bodenlösung entzieht. Da aber auch die K-Anlieferung zur Pflanzenwurzel wesentlich vom K-Diffusionsweg abhängt, wird ein sehr enges Wurzelsystem die Diffusionswege verkürzen. Für eine gute K-Versorgung der Pflanze ist es notwendig, daß die Auffangfläche für die durch die Diffusion herangetragenen K-Ionen möglichst groß ist. Daher kommt der Wurzeloberfläche eine weitaus größere Bedeutung zu als der Gesamt-Wurzelmasse. So ist es nicht verwunderlich, daß die im Modell ermittelte Wurzelmasse keinen großen Einfluß auf die Ertragsbildung und die K-Aufnahme hatte. Für die K-Aufnahmerate ist die Wurzeloberfläche verantwortlich, und zwar nur der Teil der Wurzeln, der tatsächlich zur Wasser- und Nährstoffaufnahme befähigt ist (CLARKSON 1968). GLIEMEROTH (1952) fand bei Bohnen in verschiedenen Bodentiefen recht unterschiedliche Wurzelmengen von 366 mg bis 7 mg Trockenmasse pro 1000 ccm Boden. Die Länge von 1 mg Wurzelmasse schwankte aber von 3,1 bis zu 7,7 cm. Unberücksichtigt bleibt hierbei noch der Durchmesser der Wurzeln und die Menge an Wurzelhaaren, deren Gewicht zwar sehr gering ist, die Wurzeloberfläche aber um ein Vielfaches vergrößern (DREW u. NYE 1969). Das Wurzelgewicht ist also kein Maßstab für die Wurzeloberfläche, die zur Nährstoff- und Wasseraufnahme befähigt ist. Dieses bestätigen auch die eigenen Versuche. Die Wurzeln im Nährmedium waren wenig verzweigt und hatten einen großen Durchmesser, hatten also eine im Verhältnis zum Gewicht recht geringe Oberfläche. Hier wurde aber die gesamte Oberfläche von der Nährlösung umspült, und es ist anzunehmen, daß die gesamte Oberfläche Wasser und Nährstoff aufnehmen

konnte. Die Wurzeln im Boden dagegen waren reich verzweigt, und der Anteil an sehr feinen Wurzeln war recht hoch; die Gesamtoberfläche dieser Wurzeln war also sehr viel größer als im Nährmedium. Wie CLARKSON (1968) nachweisen konnte, ist aber nicht die Gesamtoberfläche zur Wasser- und Nährstoffaufnahme befähigt. Gerade in Trockenzeiten stirbt bei älteren Wurzelteilen die Wurzelrinde ab, erhalten bleibt nur der Zentralzylinder; dieser kann zwar Wasser und Nährstoffe weiterleiten, aber nicht selbst aufnehmen. Bei einem Vorversuch mit Hafer zur "split-root"-Technik konnte diese Erscheinung ebenfalls beobachtet werden. Bei den Trockenvarianten war das Wurzelparenchym direkt über der Bodenoberfläche und z.T. im Boden abgestorben, während der Zentralzylinder noch intakt war. Zur Nährstoffaufnahme ist also immer nur ein Teil der Wurzeln befähigt, so daß im Boden der Anteil an aktiver Wurzeloberfläche dauernd schwankt.

Es besteht auch die Möglichkeit, daß die Pflanze nicht in der Lage ist, alle an die Wurzeln herandiffundierenden Ionen aufzunehmen. Im Modell wurden bei pF 1,6 höhere K-Diffusionsraten gemessen als bei pF 2,0. Die K-Aufnahmerate lag aber bei pF 2,0 wesentlich höher als bei pF 1,6. Hieraus läßt sich entnehmen, daß die der Pflanze bei pF 1,6 angebotenen K-Mengen nicht zum begrenzenden Faktor für die Ertragsbildung wurden. Vielmehr sind bei dieser Feuchtigkeitsstufe die Wurzeln und die aeroben Mikroorganismen, bedingt durch O_2 -Mangel und CO_2 -Anreicherung, in ihrem Stoffwechsel gehemmt, so daß sich toxische Stoffe anreichern, die die Nährstoffaufnahme der Wurzel behindern. Hierdurch kommt es zur verminderten K-Aufnahme und zur Ertragsdepression.

Das angewendete Prinzip der geteilten Wurzeln im Modell hatte auf die K-Versorgung keinen Einfluß. Da daß K in der Pflanze leicht beweglich ist und auch in basipetaler Richtung wandern kann, (BUKOVAC u. WILTNER 1957) waren auch die Wurzeln im Nährmedium gut mit K versorgt. Die K-Gehalte in den Wurzeln des Nährmediums und des Bodenmediums unterschieden sich nur wenig. Die etwas niedrigeren K-Gehalte der Wurzeln im Nährmedium lassen sich z.T. auf den unterschiedlichen morphologischen Aufbau der Wurzeln im Nährmedium und Bodenmedium, zum anderen Teil aber auf einen Efflux von K in die Nährlösung zurückführen, denn MARSCHNER u. SCHAFARCZIK (1967) fanden eine klare Abhängigkeit des K-Fluxes aus der Wurzel von der K-Konzentration der Außenlösung. In

dieser Versuchsdurchführung wurden zwar keine Messungen der Nährlösung auf den K-Gehalt bei Versuchsende vorgenommen, aber es ist anzunehmen, daß die Wurzeln K in die Nährlösung abgegeben hatten, da diese zu Beginn kein K enthielt.

Da die K-Diffusionsrate zu einem wesentlichen Teil von der auffangfähigen Wurzeloberfläche abhängt, ist es möglich, daß die Pflanzen, wären sie mit allen Wurzelteilen im Bodenmedium gewachsen, schon bei einem niedrigeren K-Diffusionsflux Höchstserträge erbracht hätten. Diese Möglichkeit soll nicht außer acht gelassen werden. An der qualitativen Aussage der Untersuchung ändert sie jedoch nichts, d.h. die Bodenfeuchte bestimmte maßgeblich die effektive K-Verfügbarkeit, und zwar unabhängig davon, ob das so zur Verfügung gestellte K über die gesamte Wurzelmasse oder nur über einen bestimmten Wurzelteil aufgenommen wurde.

Die im Boden diffundierenden K-Ionen werden von der Wurzeloberfläche aufgefangen. Verwertet werden kann aber nur der Anteil an K-Ionen, der auf aufnahmefähige Wurzeloberflächen einschl. Wurzelhaare trifft. Bei guter Durchfeuchtung des Bodens sind auch die größeren Poren im Boden mit Wasser gefüllt, so daß die Diffusionsbedingungen verbessert sind und die K-Diffusionsrate erhöht wird. Auch die Berührungsflächen Bodenlösung - Wurzel sind größer, so daß ein sehr viel größerer Anteil an K-Ionen aufgenommen werden kann. Bei abnehmender Feuchtigkeit verschlechtern sich einmal die Diffusionsbedingungen, der Diffusionsweg wird weiter, da die K-Ionen in den Wasserfilmen der Bodenkolloide entlang wandern müssen. Die größeren Poren sind wasserfrei, der direkte Diffusionsweg zur Pflanzenwurzel ist versperrt.

Wie die Versuchsergebnisse zeigen, besteht zwischen den Faktoren der K-Verfügbarkeit ein enger kausaler Zusammenhang. Direkt für die Pflanzenwurzel verfügbar sind die an sie herangetragenen K-Mengen. Diese K-Anlieferung vollzieht sich über Massenfluß und Diffusion. Hier konnten die engsten Beziehungen zur K-Aufnahme und Ertragsbildung gefunden werden. Entscheidend für die der Pflanze zur Verfügung stehenden K-Mengen ist also primär die K-Anlieferungsrate. Diese wird aber wesentlich vom K-Vorrat im Boden beeinflusst. Direkt auf die K-Anlieferungsrate wirkt die K-Konzentration der Bodenlösung. Wird diese erhöht, kann

sich auch die K-Anlieferungsrate erhöhen. Eine hohe K-Konzentration in der Bodenlösung ist aber nur möglich, wenn auch ein großer K - Vorrat, also austauschb.K, vorhanden ist. Die Intensität der K - Anlieferung ist also abhängig von der Quantität oder den K - Reserven. Die kausale Reihenfolge läuft wie folgt: Austauschb.K $\longrightarrow$ K - Konzentration der Bodenlösung $\longrightarrow$ K-Diffusionsrate $\longrightarrow$ K-Aufnahme $\longrightarrow$ Ertragsbildung.

Der Einfluß des Wassergehaltes oder der Wasserspannung auf die K-Verfügbarkeit erfolgt über die K-Konzentration der Bodenlösung und den K-Diffusionsfluß. Der K-Diffusionsfluß wird bei abnehmendem Wassergehalt im Boden stark gehemmt. Zwar steigt bei abnehmender Bodenfeuchte die K-Konzentration der Bodenlösung an, aber dieser Effekt kann bei weitem nicht die durch Trockenheit bedingte Hemmung der Diffusion kompensieren. Wäre dieses der Fall, hätten bei der hier gegebenen Versuchstechnik Ertrag und K-Aufnahme nicht eine derartige Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens zeigen dürfen. Die K-Reserven - das austauschbare K - werden vom Wassergehalt kaum beeinflusst.

Obwohl die Übertragung der gefundenen Ergebnisse auf Feldbedingungen schwierig ist, läßt sich hier eine qualitative Aussage über die K-Verfügbarkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden machen. Bei einer gewissen Menge an austauschb.K kann bei guter Bodendurchfeuchtung eine optimale K-Versorgung der Pflanze sichergestellt sein. Bei einer längeren Trockenperiode jedoch kann diese K-Menge evtl.nicht mehr ausreichen.Das kann schon bei einem Wassergehalt im Boden eintreten, bei dem die Pflanze noch nicht unter Wassermangel leidet, die Nährstoffzufuhr zur Pflanzenwurzel jedoch schon stark gehemmt ist. Die Pflanze ist bei einem tiefgründigen Boden meistens noch in der Lage, Wasser aus dem Untergrund aufzunehmen, jedoch kann sie wegen K - Mangel im Unterboden bei ausgetrocknetem Oberboden ihren K-Bedarf nicht decken. Fällt diese Periode in eine Wachstumszeit, in der die Pflanze viel K benötigt, z.B.zur Zeit der Bestockung oder des Schossens, kann es zu einem vorübergehend latenten K-Mangel kommen, der sich auf die Ertragsbildung negativ auswirkt. Soll eine ausreichende K - Versorgung auch in Trockenzeiten gewährleistet werden, ist es ratsam, das K-Niveau so weit anzuheben, daß die K-Anlieferungsrate zur Pflanzenwurzel auch zu dieser Zeit noch ausreichend hoch ist. Kennt man für den betreffenden Stand -

ort den kausalen Zusammenhang zwischen austauschb.K, K-Konzentration und K-Diffusionsfluß (dieser graduelle Zusammenhang ist für jeden Boden je nach Bodeneigenschaften verschieden), so wird es möglich sein, eine ausreichende K-Versorgung sicherzustellen.

VII Zusammenfassung

- - - - -

I.

Die Anwendung der heute üblichen Bodenuntersuchungsmethoden für den Nährstoff Kalium, wie laktatlösl. K oder austauschb.K, ergibt keine ausreichende Aussage über die K-Verfügbarkeit und die K-Dynamik. Diese Methoden stellen lediglich den Vorrat an Kalium fest, der der Pflanze unter geeigneten Bedingungen zur Verfügung gestellt werden kann. Da aber verschiedene Faktoren auf die K-Dynamik im Boden einwirken, ist die Menge an austauschb.K nie in ihrer Gesamtheit pflanzenverfügbar. Als wesentlichste Faktoren der K-Verfügbarkeit sind a) der K-Vorrat und b) die K-Anlieferungsrate zur Wurzel zu nennen.

a) Der leicht mobilisierbare K-Vorrat wird durch das austauschb.K gekennzeichnet. Diese Fraktion steht mit der K-Konzentration der Bodenlösung in einer Gleichgewichtsbeziehung. Diese Beziehung wird hauptsächlich durch den Tongehalt, die K-Sättigung der Tonminerale und die Art der Tonminerale bestimmt.

b) Die K-Anlieferungsrate ist verantwortlich für die K-Mengen, die an die Pflanzenwurzel herangetragen werden und von dieser aufgenommen werden können. Sie hängt wesentlich von der K-Konzentration der Bodenlösung und vom Wassergehalt des Bodens ab.

II.

Die Untersuchungen dieser Arbeit hatten das Ziel, den Einfluß des Wassergehaltes oder der Wasserspannung (pF) auf die K-Verfügbarkeit

bzw. deren Faktoren zu überprüfen. Als pflanzenverfügbares K wird die Menge an K angesehen, die im Laufe der Vegetationszeit von der Pflanze aufgenommen wurde.

Zur Untersuchung dieser Frage wurde eine Modellapparatur entwickelt, die zwei grundsätzliche Forderungen erfüllte.

1. Der Wassergehalt bzw. die Wasserspannung wurde über die gesamte Vegetationszeit in den einzelnen Varianten konstant gehalten. Hierzu wurden wassergesättigte Tonröhren in das Bodenmedium eingelagert, die mit einem Unterdruckgefäß in Verbindung standen, so daß sich der Boden bis zur gewünschten Wasserspannung Wasser aus den Tonröhren aneignen konnte.
2. Die Wirkung des Wassers auf die K-Verfügbarkeit mußte eindeutig getrennt werden vom Einfluß, den das Wasser selbst auf das Pflanzenwachstum oder auf andere Nährstoffe hat.

Mittels der "split-root"-Technik wurde über einen Wurzelteil die Pflanze mit Wasser und allen mineralischen Nährstoffen außer K versorgt. Dieser Wurzelteil befand sich in einem mit Nährlösung versehenen Quarzsandmedium. Der andere Wurzelteil befand sich im Bodenmedium. Aus ihm mußte je nach Variante bei unterschiedlicher Bodenfeuchte das K entnommen werden. Der hierfür verwendete Boden war eine Schwarzerde.

Die Untersuchungen wurden bei 4 verschiedenen Wasserspannungen (pF 1,6; 2,0; 2,4; 2,7) und 5 Kaliumstufen ($K_{-1} = 7$ mg austauschb. K / 100 g Boden; $K_0 = 11$ mg; $K_1 = 17$ mg; $K_2 = 31$ mg; $K_3 = 46$ mg) des Bodens durchgeführt.

Weiterhin wurde ein Gefäßversuch (Ahrgefäße) mit 21 verschiedenen Böden durchgeführt, um die Ergebnisse des Modellversuches im Gefäß zu überprüfen.

III.

Die Ergebnisse der Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Wassergehalt und Gehalt an austauschb. K beeinflussten das Wachstum der Pflanzen deutlich. Mit steigendem Gehalt an austauschb. K im Boden

nahmen die Erträge an oberirdischer Pflanzensubstanz bei allen Feuchtigkeitsvarianten zu. Das beste Wachstum zeigte sich in allen K-Varianten bei einer Bodenwasserspannung von $pF\ 2,0$; mit höheren Spannungen ($pF\ 2,4$ und $pF\ 2,7$), also trockenerem Boden, fiel der Ertrag kontinuierlich ab. Auch bei geringerer Wasserspannung ($pF\ 1,6$) zeigte sich im Vergleich zur $pF\ 2,0$ -Variante eine Ertragsdepression. Sie ist auf den in dieser sehr feuchten Variante ($pF\ 1,6$) ungenügenden Luftgehalt des Bodenmediums zurückzuführen.

2. Der von $pF\ 2,0$ über $pF\ 2,4$ zu $pF\ 2,7$ registrierte Ertragsabfall ist keine Folge einer ungenügenden Wasserversorgung der Pflanzen. Sie konnten aufgrund der gegebenen Versuchstechnik ("split-root"-Technik) ausreichend Wasser aus dem Quarzsandnährmedium des anderen Wurzelteiles aufnehmen. Der Ertragsabfall ist vielmehr eine Folge der mit abnehmender Bodenfeuchte verminderten K-Transportrate zur Wurzel. Daß hier K der einzige ertragsbegrenzende Faktor war, ergibt sich aus dem Befund, daß durch die K-Aufdüngung des Bodenmediums die Erträge erhöht wurden. Die ungenügende K-Anlieferung aufgrund zu hoher Wasserspannung im Boden konnte also teilweise durch eine erhöhte K-Düngung kompensiert werden.

3. Daß die K-Anlieferungsrate an die Pflanzenwurzel den grundlegenden Prozeß der K-Verfügbarkeit darstellt, zeigt sich in der guten Beziehung zwischen K-Aufnahme und K-Diffusionsfluß. Ihr Korrelationskoeffizient betrug im Modell- und Gefäßversuch $r = 0,94^{***}$. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß im Modellversuch alle Feuchtigkeits- und Düngungsvarianten, im Gefäßversuch 21 verschiedene Böden in die Korrelationsberechnung eingingen.

4. Die hochsignifikante Beziehung zwischen K-Diffusionsfluß und Ertragsbildung erhärtet die auch von anderen Autoren vertretene These, daß der weitaus größte Teil des K-Bedarfes der Pflanze nicht von der Wurzel durch Wachstum erreicht und über den Kontaktaustausch aufgenommen wird, sondern zur Wurzel hin transportiert werden muß. Die Wurzeloberfläche hat hierbei eine große Bedeutung, da sie als "Auffangfläche" der transportierten Ionen fungiert. Dabei spielt die Wurzelmassenbildung nicht die wesentliche Rolle, sondern die aufnahmefähige Oberfläche, die durch die Wurzelhaare wesentlich erhöht wird.

5. Die Nährstofftransportmöglichkeit im Boden, besonders dessen Diffusivität, ist für die effektive Nährstoffverfügbarkeit von erheblicher Wichtigkeit. Diese ist in erster Linie eine Funktion seines Wassergehaltes. Die K-Anlieferung zur Wurzel wurde bei trockenerem Boden, also bei Wasserspannungen von pF 2,4 bis pF 2,7, schon beachtlich behindert, obgleich bei diesen pF-Werten noch kein eigentlicher Wassermangel für die Pflanze zu befürchten ist. Hier ist also primär der Nährstoffmangel und nicht der Wassermangel ertragsbegrenzend.

6. Die effektive K-Verfügbarkeit, d.h. der K-Ionenfluß zur Wurzel, wird demnach in der Hauptsache von 2 Komponenten bestimmt: der K-Konzentration der Bodenlösung und den Diffusionsmöglichkeiten für K^+ . Während die eine Komponente, die K-Konzentration der Bodenlösung, im wassergesättigten Boden analytisch recht gut zu erfassen ist, kann man bei ackerbaulich genutzten Standorten die Diffusionsmöglichkeiten im voraus nicht genau abschätzen, denn sie werden maßgeblich durch die Witterung bestimmt. Aufgrund dieser Gegebenheit kann jede Bodenuntersuchung nur in begrenztem Ausmaß eine Aussage über die eigentliche, während der Vegetation vorliegende Nährstoffverfügbarkeit geben.

7. Durch die "split-root" - Technik ist die Aufnahme von Ca, Mg und Na nicht behindert. Die Ca-Aufnahme steigt mit Zunahme des Wassergehaltes leicht an. Bei der Na-Aufnahme ist ein Einfluß der Bodendurchfeuchtung nicht zu erkennen. Bei hoher K-Düngung finden sich die höchsten Na-Gehalte in den Pflanzen. Sie sind in den Wurzeln um eine Zehnerpotenz höher. Ein K/Mg - Antagonismus liegt nur bei K-Mangel vor. Hier steigt der Mg-Gehalt stärker an. Bei ausreichend mit K versorgten Pflanzen sinkt der Mg-Gehalt bis auf einen konstanten Wert ab, den er auch bei sehr hoher K-Aufnahme immer erreicht.

VIII Literaturverzeichnis

-
- AHMAD, N.u.DAVIS, C.E.: Forms of K-fertilizers and soil moisture content on potassium status of a Trinidad soil.
Soil Sci. 109, 121-126 (1970)
- BARBER, S.A.: The influence of moisture and temperature on phosphorus and potassium availability.
7th Intern. Congress of Soil Sci., Madison, Wisc., USA, 435-492 (1960)
- "- A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability.
Soil Sci. 93, 39-49 (1962)
- "-, WALKER, J.M.u.VASEY, E.H.: Mechanisms for the movement of plant nutrients from the soil and fertilizer to the plant root.
Agricultural and Food Chemistry 11, 204-207 (1963)
- BAIER, J.: Der Einfluß graduell steigender Stickstoff-Gaben unter verschiedenen Wetter-Bedingungen auf die Aufnahme von Nährstoffen und Ausnutzung für die Ertragsproduktion.
Rostlinná Vyroba 13, 1257-1276 (1967)
- BATES, T.E. and SCOTT, A.D.: Control of potassium release and reversion associated with changes in soil moisture.
Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 33, 566-568 (1969)
- BLANCHET, R.: Quelques aspects récents des études relatives à l'alimentation minérale des plantes dans le sol.
Sci. du Sol 2, 109-119 (1965)
- "-, SPUDER, R.u. CHAUMONT, C.: Some aspects of the interaction between potassium and water nutrition of plants.
Ann. agron. Paris 13, 93-110 (1962)
- BECKETT, P.H.T.: Potassium Potentials.
"Soil Potassium and Magnesium"
Technical Bulletin No. 14, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London 1967
- BOGUSLAWSKI, E. von u. DIECKE, K. von: Neue Untersuchungen über den Nährstoffentzug verschiedener Kulturpflanzen.
Zeitschr. f. Acker- und Pflanzenbau 112, 226-252 (1961)
- BRAUNSCHWEIG, L.C. von u. MENGEL, K.: Der Einfluß verschiedener, den K - Zustand des Bodens charakterisierender Parameter auf den Kornertrag von Hafer.
Landwirtsch. Forschung 1971 (im Druck)
- BROWN, D.A., PLACE, C.A. and PETTIET, J.V.: The effect of soil moisture upon cation exchange in soils and nutrient uptake by plants.
7th Intern. Congress of Soil Sci., Madison, Wisc., USA, 443-449 (1960)

- BUCHER, R.: Neuere Erkenntnisse über das Verhalten des Kaliums im Boden.
Arbeiten der DLG., 101 (1964)
- BUKOVAC, A.J. and WILTNER, S.H.: Absorption and mobility of foliar applied nutrients.
Plant Physiology 32, 428-435 (1957)
- BURNS, A.F. and BARBER, S.: The effect of temperature and moisture on exchangeable potassium.
Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 25, 349-352 (1961)
- CLARKSON, D.T., SANDERSON, J. and SCOTT RUSSEL, R.: Ion uptake and root age.
Nature 220, 805-806 (1968)
- CZERATZKI, W.: Die Bewegungen des Bodenwassers in Unterdrucklysimetern unter dem Einfluß von Verdunstung und Frostwirkung bei verschiedenem Bodenzustand.
Landbauforschung Völkenrode 16, 143-154 (1966)
- DANIELSON, R.L. and RUSSELL, R.B.: Ion adsorption by corn roots as influenced by moisture and aeration.
Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 21, 3-6 (1957)
- DITTMER, H.J.: Soil cons. 6, 33 (1940) zit. nach BARBER et al.
J. of Agricultural and Food Chemistry 11, 204 (1963)
- DREW, M.C. and NYE, P.H.: The supply of nutrient ions by diffusion to plant roots in soil. II. The effect of root hairs on the uptake of potassium by roots of rye grass (*Lolium multiflorum*)
Plant and Soil 31, 407-424 (1969)
- " - " and VAIDYANATHAN, L.V.: The supply of nutrient ions by diffusion to plant roots in soil. I. Absorption of potassium by cylindrical roots of onion and leek.
Plant and Soil 30, 252-270 (1969)
- EATON, F.M., HARDING, R.B. and GANJE, T.J.: Soil solution extractions at tenth bar moisture percentages.
Soil Sci. 90, 253-258 (1960)
- EGNÉR, H., RIEHM, H. u. DO. INGO, R.: Kungl. Lantbrukshögsk. Ann. 26, 199 (1960)
zit. nach SCHLICHTING, E. u. BLUME, H.-P. Bodenkundl. Praktikum Paul Parey Verlag 1966
- EVANS, H.J. u. SORGER, G.J.: Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations.
Ann. Rev. of Plant Physiology 17, 47-77 (1966)
- FERRARI, Th. J.: An agronomic research with potatoes on the river ridge soils of the Bommelerwaard.
Verlag Landbouwk. Onderzoek 58, 132 pp (1952)

- "- and SLUISMANS, C.M.J.: Mottling and magnesium deficiency in oats and their dependence on various factors.
Plant and Soil 6, 262-299 (1955)
- FINK, A.: Grenzwerte der Nährstoffgehalte in Pflanzen und ihre Auswertung zur Ermittlung des Düngerbedarfes.
Zeitschr.f.Pflanzenernähr. und Bodenkunde 119, 197-208 (1968)
- "- Probleme der Nährstoffversorgung von Böden und Pflanzen bei hohen Erträgen.
Schriftenreihe der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Kiel 47, 159-170 (1970)
- FORSTER, H. u. MENGEL, K.: Der Einfluß einer im Jugendstadium kurzfristig unterbrochenen K-Ernährung auf Ertragsbildung und Gehalt an Mineralstoffen und löslichen Aminosäuren.
Zeitschr.f.Acker- und Pflanzenbau 132, 203-213 (1969)
- GARTTEL, W.: Stärkeres Auftreten von Kalimangel als Folge der an - haltenden Dürre.
"Der Deutsche Weinbau" 16, 651-656 (1964)
- JAIN SUNEY, J.P.: Changes occurring during a year in the soluble phosphorus and potassium in soil under crops in rotation experiments at Rothamsted, Woburn and Saxmundham.
J.Agric.Sci. 66, 399-412 (1966)
- GLIE BROTH, S.: Wasserhaushalt des Bodens in Abhängigkeit von der Wur - zelausbildung der Kulturpflanzen.
Zeitschr.f.Acker- und Pflanzenbau 95, 21-46 (1952)
- GRAMHAM-BRYCE, I.J.: The movements of potassium and magnesium ions in soil in relation to their availability.
"Soil Potassium and Magnesium" Technical Bulletin No.14, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London (1967)
- GREENWOOD, R.: Effect of oxygen distribution in the soil on plant growth.
W.J.Wittington Proceedings of the 15th Easter School in Agricultural Science, University of Nottingham, 1968.
- GRIBBE, H., NÉMETH, K., BRAUNSCHWEIG, L.C.von: Some factors controlling po - tassium availability in soils.
Intern.Symp.of Soil Fert.Evaluation, New Delhi 1971 (im Druck)
- "-.-"-.-"- Beziehungen zwischen dem Verhalten des Kaliums im Boden und der K-Ernährung der Pflanze.
Landwirtschaftl.Forschung 1971 (im Druck)
- HALLMOND, L.C., ALLAWAY, W.H. and LOO IS, W.E.: Effects of oxygen and carbon dioxyd levels upon absorption of potassium by plants.
Plant Physiology 30, 155-161 (1955)

- HARRIS, J.G. and BAVEL van, C.H.M.: Nutrient uptake and chemical composition of tobacco plants as affected by the composition of the root atmosphere.
Agronomy J. 49, 176-181 (1957)
- HESLEP, J.M. and BLACK, C.A.: Diffusion of fertilizer phosphorus in soils.
Soil Sci. 78, 389-401 (1954)
- HUFFAKER, R.C. and WALLACE, A.: Sodium absorption by different plant species at different potassium levels.
Soil Sci. 87, 130-134 (1959)
- JENNY, H. and OVERSTREET, R.: Contact effect between plant roots and soil colloids.
Proc. Nat. Sci. 24, 384-392 (1938)
- JUANG, T.C. and CHAN, C.S.: The effect of soil moisture on the availability of phosphorus and potassium.
Taiwan Sugar Experiment Station 40, 113-125 (1966)
- KAUFFMAN, I.D. and BOUDLIN, D.R.: Relationships of exchangeable and non-exchangeable potassium in soils adjacent to cation exchange resins and plant roots.
Soil Sci. 104, 145-150 (1967)
- KÖHNLEIN, J. u. KNAUER, N.: Über die Verwendung der Pflanzenanalyse zur Ermittlung des Kalidungsbedürfnisses von Ackerböden.
Zeitschr. f. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 86, 36-49 (1959)
- LE ROUX, J. and SUMMER, M.E.: Studies on the soil solution of various natural soils.
Geoderma 1, 125-130 (1967)
- MARSCHNER, H. u. SCHAFARCZYK, W.: Vergleich der Nettoaufnahme von Natrium und Kalium bei Mais- und Zuckerrübenpflanzen.
Zeitschr. f. Pflanzenernähr. und Bodenkunde 118, 187-201 (1967)
- MEDERSKI, H.J. and STACKHOUSE, J.: Relation of plant growth and ion accumulation to soil moisture, level stabilized with a divided root-technique.
7th Intern. Congress of Soil Sci., Madison, Wisc., USA., 467-474 (1960)
- "- and WILSON, J.H.: Relation of soil moisture to ion absorption by corn plants.
Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 24, 149-152 (1960)
- MENGEL, K.: Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze.
4. Auflage, Gustav Fischer Verlag Stuttgart 1972
(in Druck)

- "- u. AKSOY, .: Die Kaliumkonzentration der Bodenlösung und ihre Bedeutung für die Ertragsbildung von Sommerweizen. Zeitschr.f.Pflanzenernähr.und Bodenkunde,128, 28-41 (1971)
- "- u.FORSTER,H.: Der Einfluß einer zeitlich variierten unterbrochenen K-Ernährung auf Ertrags- und Qualitätsmerkmale von Gerste. Zeitschr.f.Acker- und Pflanzenbau 127, 317-326 (1968)
- "- u. -"-: Der Einfluß der K-Konzentration der Nährlösung auf die Ertragsbildung, die Qualität und den K-Aufnahmeverlauf bei Hafer. Plant and Soil 34 1/71 (im Druck)
- "- ,GRILLME,H.u.NEUBATH,K.: Potentielle und effektive Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen im Boden. Landwirtschaftl.Forschung 23,1.Sonderheft,79-91 (1969)
- MOSS,J.: Some aspects of the cation status of soil moisture. V. The effect of soil moisture tension on growth and cation uptake by plants. Plant and Soil 20, 271-286 (1964)
- NEUBATH,K., MENGEL,K.u.GRILLME,I.: The concentration of K, Ca and Mg in the saturation extract in relation to exchangeable K, Ca and Mg. Soil Sci.109, 179-185 (1970)
- NYL, P.H.: The effect of the nutrient intensity and buffering power of a soil, and the absorbing power, size and root hairs of a root, on nutrient absorbing by diffusion. Plant and Soil 25, 81-105 (1966)
- CEHM,E.: Nährstoffaufnahme, Nährstoffverhältnis und Nährstoff - bilanz im Ackerbau der Waberner Senke. Diss.Gießen 1966
- LIVER,S.and BARBER,S.A.: An evaluation of the mechanisms governing to the supply of Ca, Mg, K and Na to soy-bean roots (Glycine max) Soil Sci.Soc.of Amer.Proc. 30, 82-86 (1966)
- OLSEN,S.R.and WATANABE,F.S.: Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. Soil Sci.Soc.of Amer.Proc. 27, 648-653 (1963)
- "- , -"- and DANIELSON,R.E.: Phosphorus absorption by corn roots as affected by moisture and phosphorus concentration. Soil Sci.Soc.of Amer.Proc. 25, 289-294 (1961)
- PAAW,F. van der: Relation between the potash requirements of crops and meteorological conditions. Plant and Soil 9, 254-268 (1958)

- PATRICK, W.H.J. and WYATT, R.: Soil nitrogen loss as a result of alternate submergence and drying.
Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 28, 647-653 (1964)
- PETERS, D.B. and RUSSELL, M.B.: Ion uptake by corn plants seedlings as effected by temperature, ion concentration, moisture tension and moisture content.
7th Intern. Congress of Soil Sci., Madison, Wisc., USA, 457-466 (1960)
- PLACE, G.A. and BARBER, S.A.: The effect of soil moisture and Rubidium concentration on diffusion and uptake of Rubidium-86.
Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 28, 239-243 (1964)
- RAJKOVIC, Z.: Die Wirkung feuchter und trockener Böden auf die Kalium-Mobilisierung.
Savremena Poljoprivreda, Novi Sad 15, 1633-1637 (1967)
zit. nach Landwirtschaftl. Zentralblatt Abtlg. II, 13, 1033 (1968)
- RAHESACK, K. u. JUNGK, A.: Beziehungen zwischen dem laktatlöslichen Kalium des Bodens und der Wirkung der Kaliumdüngung auf den Ertrag von Sellerie.
Die Gartenbauwissenschaft 33, 237-246 (1968)
- "- u. SCHACHTSCHABEL, P.: Beziehungen zwischen den Ergebnissen von Bodenuntersuchungen und der Wirkung einer P- und K-Düngung auf den Ertrag von Gemüse.
Die Gartenbauwissenschaft 28, 1-17 (1963)
- RICHARDS, L.A.: A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution.
Soil Sci. 51, 377-386 (1941)
- RUSSELL, J.: 85 Jahre Düngungsversuche in Rothamsted.
ernähr. Pflanze 24, 258 (1928)
- SARIĆ, M., DIMITRIJEVIĆ, D., CUPINA, T., CURIĆ, R. and GERIĆ, J.: Effect of mineral nutrition and soil moisture on some physiological and biochemical characteristics of yield of wheat.
Savremena Poljoprivreda 14, 423-444 (1966)
- SCHACHTSCHABEL, P.: Der anzustrebende pH-Wert, Phosphor- und Kaliumgehalt in Ackerböden.
Landwirtschaftl. Forschung 17, 60-82 (1963)
- SCHARRER, K. u. MENGEL, K.: Über den Kalium-Magnesium-Antagonismus bei Mais und Sonnenblumen.
Zeitschr. für Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 83, 149-162 (1958)
- "- -"- Aufnahme und Verteilung der Kationen Ca, Mg, K und Na in der Pflanze bei variierter K- und Mg-Düngung sowie bei extraradikaler K-Versorgung.
Plant and Soil XII, 377-396 (1960)

- SCHIEFFER, F. u. SCHACHTSCHABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde.
7. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1970
- , WELTE, E. u. Graf von REICHENBACH, H.: Über den Kaliumhaushalt und Mineralbestand des Göttinger E-Feldes.
Zeitschr. f. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde 88, 115-128 (1960)
- SCHROEDER, D., HOFFMANN, H. u. Graf von REICHENBACH, H.: Beziehungen zwischen dem Kalium-Ernährungszustand der Pflanzen und den Ergebnissen der Bodenuntersuchung.
Landwirtschaftl. Forschung, 15. Sonderheft, 48-60 (1961)
- SCHWERDT, K. u. JESSEN, W.: Düngungserfolg durch Kali auf hessischen Lössböden.
Landwirtschaftl. Forschung 14, 160-167 (1961)
- STEINECK, O.: Die Nährstoffversorgung der Kulturpflanzen und ihre Sicherstellung.
Vortrag auf der Wintertagung des Verbandes landwirtschaftl. Gutsbetriebe in Oesterreich, Wien 1967
- ULRICH, B.: Die Wechselbeziehungen von Boden und Pflanze in physikalisch-chemischer Betrachtung.
Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1961
- VAIDYANATHAN, L. V., DREW, M. C. and NYE, P. H.: The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. IV. The concentration dependence of diffusion coefficients of potassium in soils at a range of moisture levels and a method for the estimation of the differential diffusion coefficient at any concentration.
The Journal of Soil Sci. 19, 94-107 (1968)
- WALLACE, T.: Potassium uptake in relation to soil moisture.
Potassium Symp. Madrid, 141-147 (1958)
- WIERZUM, L. K.: Soil-water content in relation to nutrient uptake by the plant.
Comm. Hydrol. Onderzoek. WNO Verslag Meded 15, 74 - 89 (1969)
- WIKLANDER, L.: Forms of potassium in the soil.
"Kalium-Symp." des Intern. Kali-Institutes Bern, 109-121 (1954)
- WILLIAMSON, R. E.: The effect of root aeration on plant growth.
Plant Physiology 37, Proceedings of the Annual Meetings L 22 (1962)
- WIPPER, B.: Untersuchungen zur Verbesserung des Nährstoffzustandes der Böden in Verbindung mit der Auswertung der systematischen Bodenuntersuchung.
Deutsche Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin. Sitzungsberichte XVI, Heft 8 (1967)
- WOODROFF, C. M.: Ionic equilibria between clay and dilute soil solution.
Soil Sci. Soc. of Amer. Proc. 19, 36-40 (1955)

Danksagung

- - - - -

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof.Dr.Mengel für die Überlassung des Themas sowie für sein Interesse und die laufende Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

Ferner danke ich allen Angehörigen der Landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Büntehof, Hannover, besonders Herrn Dr.Grimme und Herrn Dr.Németh für ihre stete Hilfsbereitschaft.

Weiterhin gilt mein Dank der Kali und Salz G.m.b.H.für die finanzielle Unterstützung sowie die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes auf dem " Büntehof ".

Lebenslauf

Am 18. Oktober 1941 wurde ich, Leo-Christian v. Braunschweig, in Danzig als drittes Kind des Landwirts Philipp v. Braunschweig und seiner Ehefrau Lieselotte geb. Pollnau geboren. Nach der Flucht aus Pommern besuchte ich von Herbst 1947 bis Herbst 1951 die Volksschule in Buch a/F Krs. Lichtenfels/Bayern und ab Herbst 1951 die Oberrealschule Lichtenfels. Dort legte ich im Sommer 1963 das Abitur ab. Anschließend absolvierte ich ein landwirtschaftliches Praktikum von 11/2 Jahren mit Abschluß einer Praktikantenprüfung. Ab Wintersemester 1964/65 bis Wintersemester 1965/66 studierte ich an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Göttingen, im Sommersemester 1966 an der Landwirtschaftlichen Fakultät für Landbau der TU Berlin, anschließend wieder in Göttingen. Im Herbst 1968 legte ich dort die Diplomprüfung in der Fachrichtung Pflanzenproduktion ab. Vom Sommersemester 1969 an setzte ich mein Studium an der Landwirtschaftlichen Fakultät in Gießen fort. Im Dezember 1968 begann ich an der Landwirtschaftlichen Forschungsanstalt Bünthehof, Hannover, mit den Arbeiten vorliegender Dissertation.

